



**André Filipe Marques
Gomes**

ThereMax: o Theremin Ultra-sónico

ThereMax: the Ultrasonic Theremin



**André Filipe Marques
Gomes**

ThereMax: o Theremin Ultra-sónico

ThereMax: the Ultrasonic Theremin

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica de António Guilherme Rocha Campos e José Manuel Neto Vieira, Doutores do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

O Júri / The Jury

Presidente

Professora Doutora Ana Maria Perfeito Tomé

Professora Associada da Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Salviano Filipe Silva Pinto Soares

Professor da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Professor Doutor José Manuel Neto Vieira (Orientador)

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António Guilherme Rocha Campos (Co-orientador)

Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

**agradecimentos /
acknowledgements**

Antes de mais agradeço a dedicação e disponibilidade demonstradas pelos meus orientadores Professor Doutor António Guilherme Rocha Campos e Professor Doutor José Manuel Neto Vieira, no decorrer do presente trabalho. Expresso a minha gratidão aos Engenheiros Cláudio Monteiro, Paulo Onofre e Frederico Sobreira da Globaltronic, ao Ricardo Henriques e ao Casimiro Braga da HFA, ao Sr. Matos da RST, ao Sr. Carlos Tavares da EEE e ao Emanuel Lobo da Circuitotal - foram um grande contributo para a evolução do meu trabalho.

Um agradecimento especial para o Engenheiro Daniel Albuquerque que com a sua pronta disponibilidade contribuiu para os resultados obtidos.

Não posso também esquecer o apoio dos meus familiares e de todos os meus amigos e colegas que colaboraram, de diversas formas, para a realização deste projecto.

Resumo

O Theremin, inventado por Léon Theremin em 1919, é considerado o primeiro instrumento musical completamente electrónico. Neste, ao contrário dos instrumentos tradicionais, podem-se produzir sons musicais sem contacto físico. Composto por duas antenas, onde o movimento das mãos do utilizador provoca uma variação na frequência e na amplitude do som. O ThereMax pretende recriar o conceito do Theremin numa perspectiva totalmente digital. Na realização do ThereMax foram introduzidas algumas inovações, das quais se destacam: a utilização de ultra-sons para detectar a posição de cada mão; a utilização de um DSP para criar, analisar e processar todos os sinais envolvidos; a disponibilidade de uma interface MIDI para o utilizador e efeitos luminosos por mapeamento entre som e cor, usando LEDs RGB. Desta forma, o Theremin passa de um instrumento analógico para um instrumento digital com todas as vantagens que esta área proporciona.

Abstract

The Theremin, invented by Léon Theremin in 1919, is considered the first fully electronic musical instrument. With the Theremin, unlike conventional instruments, it allows musical sound to be produced without physical contact. The movement of the user's hands, detected by two antennas, controls the frequency and amplitude of the sound generated by the instrument. The ThereMax intends to recreate the concept of the Theremin in a completely digital perspective. The design of the ThereMax introduced a number of innovations, such as ultrasonic hand position detection, the use of a DSP to create, analyze and process all the signals involved, a MIDI interface and RGB LED light effects based on sound-light mapping. With the design developed in this project, the old analog Theremin turns digital, thus benefiting from the advantages offered by DSP systems.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Estrutura da Tese	3
2	Instrumentos electrónicos	4
2.1	Introdução	4
2.2	Theremin	4
2.2.1	Resumo histórico e princípio de funcionamento	4
2.2.2	Evolução do Theremin	7
2.3	Hiper-instrumentos	8
2.3.1	Associação entre som e cor	9
2.3.2	MIDI	9
2.3.3	MAX	12
3	Medição da posição da mão com Ultra-Sons	14
3.1	Introdução	14
3.2	Ultra-sons na detecção de obstáculos	14
3.2.1	Propagação dos ultra-sons no ar	15
3.2.2	Modelo das reflexões	16
3.3	Sinais utilizados e técnicas de processamento	16
3.3.1	Chirp e filtro óptimo	17
3.3.2	Sinusóide e filtro passa-banda	18
3.3.3	Análise comparativa	19
3.4	Pré-projecto	20
3.4.1	<i>Setup</i> experimental e meio circundante	20
3.4.2	Metodologia dos ensaios	20
3.4.3	Escolha de sensores	22
3.4.4	Aquisição com hardware existente	23
3.4.5	Aquisição com a placa de som	27
3.4.6	Aquisição com vários receptores	30
3.4.7	Estudo de interferências	31
3.4.8	Ruído eléctrico	33

3.4.9	Conclusões	34
4	Projecto de um Theremin Ultra-sónico	35
4.1	Introdução	35
4.2	Descrição global do sistema	35
4.2.1	Número de sensores	35
4.2.2	Sinal utilizado	35
4.2.3	Frequência de amostragem	36
4.2.4	Saída áudio e MIDI	37
4.3	Algoritmo de medição da distância da mão	38
4.3.1	Tarefas implementadas	39
4.4	Sistema de aquisição e processamento	43
4.4.1	Unidade de processamento	43
4.4.2	Placa de aquisição - <i>Locus Board V3</i>	43
4.4.3	Sistema de envio/recepção de ultra-sons	44
4.4.4	<i>Line Out</i>	46
4.4.5	Interface MIDI	47
4.4.6	Evolução do <i>Hardware</i> e do <i>Software</i>	48
4.5	Técnicas para redução da interferência do ruído	55
4.5.1	Diminuição da interferência da unidade de processamento na placa de aquisição	55
4.5.2	Blindagem dos sensores Emissores e Receptores	55
4.5.3	<i>Oversampling</i>	55
5	Resultados	57
5.1	Introdução	57
5.2	Ensaios de verificação do funcionamento do Theremin	57
5.3	Resultados finais	58
5.3.1	Detecção da posição da mão	58
5.3.2	MIDI e saída áudio	61
6	Conclusões e trabalho futuro	62
6.1	Discussão geral dos resultados	62
6.2	Trabalho futuro	62
	Bibliografia	64
A	Hardware	67
A.1	Esquema eléctrico da Locus Board V3	68
A.2	Nova placa de aquisição	71
A.3	Esquema eléctrico da <i>Locus Board 2007</i>	72
A.4	Esquema eléctrico do sistema multi-sensor	78
A.5	Esquema eléctrico do Ataque dos LED RGB	80
A.6	<i>Data sheet</i> da fonte de alimentação	81

B	Software DSP	82
B.1	Aquisição/Recepção	83
B.2	Detecção de pico	84
B.3	Filtragem das Medidas	85
B.4	Áudio	86
B.5	Midi	87
B.6	Função Histerese	88
B.7	Função FM	89

Lista de Figuras

1.1	Revista <i>Popular Electronics</i> (Edição: Abril de 1955 [E.55])	1
1.2	Evolução do <i>Theremin</i> segundo a concretização deste projecto (obtidas de [Clu06])	2
2.1	Imagens do <i>Theremin</i>	5
2.2	Cartaz de do filme “ <i>Theremin, an Electronic Odissey</i> ”, em que Léon Theremin participou (obtida de [Clu06])	6
2.3	Fotografia de um Etherwave Theremin (obtida de [Mus08])	7
2.4	Exemplo de alguns Theremins comercializados	7
2.5	Diagrama ilustrativo da estrutura de um hiper-instrumento	8
2.6	Imagens dos primeiros órgãos de cores (imagem obtida de [McD06])	10
2.7	Três séculos de escalas de cores (imagem obtida de [Col04])	10
2.8	Tipos de mensagens MIDI	12
2.9	Descrição das mensagens MIDI	12
3.1	Atenuação de um sinal de ultra-sons a 100 KHz para 1 atm (fonte: Airmar Technology Corporation)	16
3.2	Diagrama ilustrativo do modelo das reflexões	17
3.3	Chirp sintetizado no matlab	18
3.4	Comparação entre o <i>chirp</i> e a sinusóide	19
3.5	Fotografia do <i>setup</i> experimental construído	20
3.6	Diagrama ilustrativo do meio circundante	21
3.7	Fotografias ilustrativas do ambiente criado	21
3.8	Diagrama de blocos relativo ao processamento realizado no matlab	22
3.9	Fotografia dos sensores testados	22
3.10	Resultados obtidos com os dois tipos de sensores	23
3.11	Obstáculos utilizados	23
3.12	Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 1 e 4	24
3.13	Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 1 e 4	25
3.14	Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 2 e 3	25
3.15	Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 2 e 3	26
3.16	Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 5 e 6	26
3.17	Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 5 e 6	27
3.18	Diagrama de blocos do sistema implementado	27

3.19	Diagrama de blocos do sistema implementado	28
3.20	<i>Hardware</i> utilizado nos testes	28
3.21	Resultados dos testes da tabela 3.2	29
3.22	Sistema desenvolvido para criar diversidade espacial	30
3.23	Comparação dos sinais obtidos na saída da <i>ADC</i>	32
3.24	Identificação dos ecos causados pelo meio circundante	33
3.25	Comparação entre o ruído dos sistema com a placa de som e o sistema anterior	33
4.1	Comparação do Theremin original com o ThereMax	36
4.2	Diagrama ilustrativo da distância mínima	36
4.3	Diagrama ilustrativo do funcionamento geral do sistema	38
4.4	Diagrama temporal representativo das tarefas implementadas	39
4.5	Diagrama ilustrativo da tarefa Aquisição/Recepção	40
4.6	Diagrama ilustrativo da tarefa Detecção de pico	40
4.7	Diagrama ilustrativo da tarefa Filtragem das medidas	41
4.8	Diagrama ilustrativo da tarefa responsável pelo áudio	42
4.9	Diagrama ilustrativo da tarefa responsável pelo <i>MIDI</i>	42
4.10	Diagrama do representativo do sistema de aquisição e processamento	44
4.11	<i>Kit eZdsp F2812</i>	44
4.12	Placa de aquisição e blocos constituintes	45
4.13	Sistema de envio/recepção de ultra-sons e blocos constituintes	45
4.14	Diagrama da Estrutura de suporte	46
4.15	Diagrama da implementação da interface <i>MIDI</i>	47
4.16	Diagrama representativo das mensagens <i>midi</i> enviadas	48
4.17	Diagrama do sistema de aquisição multi-sensor	49
4.18	Placas desenvolvidas para os sensores ultra-sons	50
4.19	Mapeamento ente som e cor	51
4.20	Caixa em acrílico e a descrição dos blocos constituintes	51
4.21	Caixa em acrílico - vista de lado	52
4.22	Placa de interface com os LED RGB	52
4.23	Diagrama ilustrativo da tarefa Detecção de pico	53
4.24	Controlo da cor dos LED RGB	53
4.25	Modulação FM	54
4.26	Fotografia do <i>kit eZdsp</i> juntamente com o plano de massa implementado	55
4.27	Blindagem dos sensores de ultra-sons	56
4.28	Diagrama ilustrativo do <i>oversampling</i>	56
4.29	Ruído eléctrico sem e com <i>oversampling</i>	56
5.1	Diagrama ilustrativo da metodologia dos ensaios realizados	58
5.2	Resultados obtidos para o ensaio 1	59
5.3	Resultados obtidos para os ensaio 2 e 3	60
5.4	Evolução da detecção da posição da mão - 3 receptores	60
5.5	Comparação das medições efectuadas - 1 receptor e 3 receptores	61

A.1	Esquemático <i>Locus Board V3</i> , parte 1	68
A.2	Esquemático <i>Locus Board V3</i> , parte 2	69
A.3	Esquemático <i>Locus Board V3</i> , parte 3	70
A.4	Esquemático da nova placa de aquisição desenvolvida para a <i>Locus Board V3</i>	71
A.5	Esquemático dos conectores existentes na <i>Locus Board 2007</i>	72
A.6	Esquemático da DAC da <i>Locus Board 2007</i>	73
A.7	Esquemático das entradas e saídas da <i>Locus Board 2007</i>	74
A.8	Esquemático do pré-amplificador áudio da <i>Locus Board 2007</i>	75
A.9	Esquemático do amplificador de ganho programável da <i>Locus Board 2007</i> . .	76
A.10	Esquemático da alimentação da <i>Locus Board 2007</i>	77
A.11	Esquemático do par emissor/receptor	78
A.12	Esquemático do sistema multi-sensor	79
A.13	Esquemático do sistema de ataque dos LED RGB	80
A.14	Localização do ficheiro com o <i>datasheet</i> da fonte de alimentação	81
B.1	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a aquisição/recepção	83
B.2	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a detecção de pico .	84
B.3	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a filtragem	85
B.4	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a produção de som	86
B.5	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para o MIDI	87
B.6	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para bisterese	88
B.7	Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a modulação FM .	89

Lista de Tabelas

3.1	Testes realizados e respectivos ficheiros	24
3.2	Testes realizados e respectivos ficheiros	29
3.3	Testes realizados e respectivos ficheiros	31

Acrónimos

ADC	Analog-to-Digital Converter.
DAC	Digital-to-Analog Converter.
DSP	Digital Signal Processor.
FIR	Finite Impulse response.
FM	Frequency Modulation.
IIR	Infinite Impulse Response.
IRCAM	Institut de Recherche et Coordination AcoustiqueMusique.
LED	Light Emitting Diode.
LOCUS	Localização Ultra-sónica.
MIDI	Musical Instrumental Digital Interface.
PCB	Printed Circuit Board.
PWM	Pulse Width Modulation.
RCA	Radio Corporation of America.
RGB	Red Green Blue.
SCI	Serial Communication Interface.
SPI	Serial Peripheral Interface.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Em 1919, um cientista soviético chamado Léon Theremin inventou o primeiro instrumento musical completamente electrónico. Este era um instrumento totalmente diferente dos instrumentos da época, uma vez que não tinha cordas, tubos, nem teclas (características usuais de um instrumento daquela altura). O músico, na verdade, não precisava de tocar no instrumento para que este emitisse som. O *Theremin*, nome dado ao instrumento em causa, rapidamente ficou conhecido em todo o mundo, aparecendo em revistas (figura 1.1) e mesmo em filmes.



Figura 1.1: Revista *Popular Electronics* (Edição: Abril de 1955 [E.55])

Léon acabaria por ser considerado um dos maiores pioneiros no desenvolvimento de música electrónica, através do místico *Theremin*.

O funcionamento do *Theremin* é muito simples, quando não existem obstáculos perto das antenas, os osciladores produzem corrente eléctrica com a mesma frequência. Ao colocar a mão perto da antena, a frequência de um dos osciladores varia e, deste modo, as correntes eléctricas de alta frequência somam-se, produzindo uma corrente com baixa frequência. E

assim é gerado o som que se ouve, após amplificação. Portanto, para alterar a frequência emitida, aproxima-se a mão da antena (quanto mais se encostar a mão, maior será a frequência).

Na figura 1.2 encontra-se um dos primeiros *Theremins* fabricados pela [Radio Corporation of America \(RCA\)](#), no meio o *Theremin* construído por Bob Moog e, por fim, o *Theremin* que se pretende desenvolver neste projecto.



Figura 1.2: Evolução do *Theremin* segundo a concretização deste projecto (obtidas de [Clu06])

Nos tempos que decorrem, este conceito foi alargado e existem inúmeras possibilidades de actuar um instrumento musical, tal como já existem variadíssimos instrumentos que se baseiam no movimento para sintetizar sons musicais. O recurso à tecnologia dos ultra-sons parece ser uma solução muito interessante para realizar a associação entre o movimento e o som.

1.2 Objectivos

Este projecto teve como objectivo construir um Theremin baseado em ultra-sons, isto é, com o mesmo conceito do *Theremin* original mas, em alternativa, serão utilizados sensores ultra-sons para obter o efeito das antenas. Desta forma, o sistema deverá realizar a modulação da frequência e amplitude de uma nota musical em função da proximidade de um obstáculo, que poderá ser a mão, em relação aos sensores.

Será necessário programar um [Digital Signal Processor \(DSP\)](#) e desenvolver o hardware necessário, de modo a implementar um sistema de detecção por ultra-sons, assim como a síntese das notas musicais. O sistema deverá igualmente possuir [Musical Instrumental Digital Interface \(MIDI\)](#), podendo comunicar com dispositivos [MIDI](#) (Computadores, Teclados, Sintetizadores, etc). Este sistema pretendido está representado no lado direito da figura 1.2.

1.3 Estrutura da Tese

Este documento descreve todo o trabalho desenvolvido para a criação de um *Theremin* com base em ultra-sons, desde a fase de pesquisa e aprendizagem até à fase de desenvolvimento (quer de software, quer de hardware). A estrutura deste documento é constituída por 6 capítulos, nomeadamente este capítulo introdutório (capítulo 1) onde se apresenta o enquadramento do projecto e os objectivos a cumprir.

No capítulo 2 são apresentados os instrumentos electrónicos, por forma a enquadrar o leitor no tema que está subjacente ao *Theremin*. É apresentado o *Theremin*, o seu resumo histórico e os instrumentos que o sucederam. Por forma a descrever o tipo de instrumentos onde o *Theremin* se insere, são apresentados os Hiper-instrumentos, onde se descrevem algumas características destes e as associações que representam a expansão de um instrumento, interfaces mais utilizadas (MIDI) e um software de programação muito conhecido entre os entusiastas deste tipo de instrumentos - o MAX.

A abordagem à tecnologia dos ultra-sons é realizada no capítulo 3, em que se descreve a detecção de obstáculos através destes, tal como a propagação dos ultra-sons no ar. Neste capítulo apresenta-se o estudo realizado ao nível dos sinais utilizados, técnicas de processamento de sinal e testes realizados ao hardware necessário, assim como a descrição dos problemas inerentes ao uso de ultra-sons. Por fim, apresentam-se algumas técnicas que visam melhorar a eficiência do sistema na detecção de obstáculos.

No capítulo 4, é apresentado o projecto do *Theremin* ultra-sónico, onde se descrevem as especificações e características do sistema projectado. São descritos todos os algoritmos desenvolvidos e as técnicas usadas para a medição da distância da mão, a evolução do hardware assim como a associação entre a som e a cor. Finalmente são apresentadas as técnicas implementadas para a redução do ruído existente no sistema.

Os resultados finais encontram-se descritos e analisados no capítulo 5, assim como os resultados dos testes realizados para verificação do bom funcionamento do sistema desenvolvido.

Finalizando, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões a que se chegou e as perspectivas de trabalho a realizar no futuro.

Capítulo 2

Instrumentos electrónicos

2.1 Introdução

Consideram-se instrumentos musicais os objectos destinados à produção de sons. Tiveram origem na mais remota antiguidade, com fins de diversão e entretenimento, cultos religiosos e comunicação entre tribos. Com o tempo, foram evoluindo, tornando-se mais sofisticados e rigorosos na afinação. Surgiram então os instrumentos de cordas, de sopro e de percussão (sendo estes os primeiros a aparecer, pela sua simplicidade). O aparecimento da electrónica, nos inícios do século XX, trouxe a possibilidade de amplificar o som emitido por um instrumento, o que levou à divisão dos instrumentos musicais em duas categorias:

- Acústicos;
- Electrónicos.

O Theremin, marcou o início da era electrónica nos instrumentos, sendo uma das maiores inovações dentro desta área. De seguida, apareceram os sintetizadores, samplers, entre outros. Actualmente, a oferta de instrumentos electrónicos é um mundo sem fim. No página web <http://www.artnet.com.br/pmotta/lista.htm>, encontra-se uma descrição por ordem cronológica dos instrumentos musicais que foram surgindo, desde a antiguidade grega até ao início da era electrónica.

2.2 Theremin

2.2.1 Resumo histórico e princípio de funcionamento

O Theremin foi inventado em 1919 pelo engenheiro russo *Léon Theremin*. Naquela época, foi considerada uma ideia muito futurista. Não só por ser o primeiro instrumento electrónico, mas também pela forma como funcionava, sem qualquer contacto físico com o executante, bastando apenas aproximar e afastar as mãos para obter o som que surge como resposta ao movimento [G.97]. Na figura 2.1a apresenta-se o *Theremin*.



(a) Léon Theremin e o Theremin (imagem obtida de [The05])

Feb. 28, 1928.

L. S. THEREMIN

1,661,058

METHOD OF AND APPARATUS FOR THE GENERATION OF SOUNDS

Filed Dec. 5, 1925

6 Sheets-Sheet 1

Fig. 7.

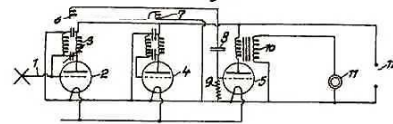


Fig. 1a.

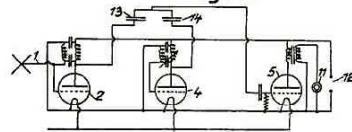


Fig. 2.

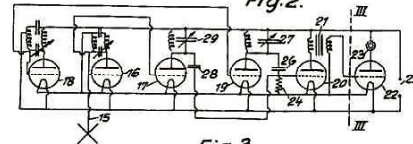
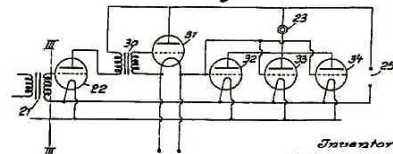


Fig. 3.



Transformer:
des Constructions THEREMIN
25 Avenue de la République
Paris

(b) Circuitos relativos aos osciladores que constituem o Theremin (imagem obtida de [The05])

Figura 2.1: Imagens do *Theremin*

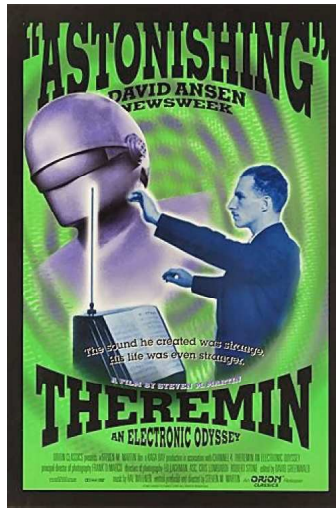


Figura 2.2: Cartaz de do filme “*Theremin, an Electronic Odyssey*”, em que Léon Theremin participou (obtida de [Clu06])

Léon Theremin, mestre em Física e Astronomia, mas com formação em música, quis construir um instrumento que não fosse operado por via mecânica, contrariamente aos tradicionais. Numa entrevista colocada na Internet [Sag06], afirmou estar interessado na criação de um novo conceito de instrumento musical, com base na exploração dos recursos da electricidade, dando a esta um uso musical. Léon descobriu também que o corpo humano causava interferência nos sistemas radiofónicos, na medida em que provocava um deslize na frequência dos transmissores radiofónicos. Assim, inventou um novo instrumento constituído por dois osciladores de alta frequência que produzem corrente eléctrica.

Este instrumento é composto por dois osciladores, um com uma frequência fixa de 170KHz e o outro com uma frequência que varia entre 168KHz a 170KHz conforme as alterações ocorridas no campo magnético originadas pela aproximação da mão à antena. A diferença entre as frequências fixa e variável origina uma frequência audível entre os 0Hz e os 2000Hz . A produção do som pelo *Theremin* é controlada pela antena na transversal, que faz variar a frequência, e pela antena na longitudinal, que altera a amplitude do som que se está a produzir. Apresenta-se figura 2.1b um pequeno esquema patenteado por Léon Theremin.

O *Theremin* é considerado o impulsionador da música e dos instrumentos electrónicos, sendo um instrumento extremamente popular desde o seu aparecimento. Em 1928, a apresentação do *Theremin* nos Estados Unidos da América foi um enorme sucesso. Os espectadores fascinaram-se com os sons fora do comum, classificando-os como “bizarros, mas ao mesmo tempo encantadores”. Apresenta-se na figura 2.2 um cartaz de um filme em que Léon Theremin participou, com o seu *Theremin*.

O *Theremin* é um instrumento muito virtuoso, na medida em que alia um som muito

característico à dificuldade de se tocar uma música segundo uma pauta. É agradável ver alguém tocar, tal como é agradável ouvir. Serão estas características que justificam o culto de volta do *Theremin* [G.97]. Um possível indicador da popularidade deste instrumento é o facto de, ao efectuar uma pesquisa num motor de busca, se encontrarem cerca de 2 milhões de referências.

2.2.2 Evolução do Theremin

Com o início da Segunda Guerra Mundial, o Theremin ficou esquecido. Apenas um pequeno grupo de fãs alimentava o culto do Theremin. Entre estes, estava Robert Moog, que começou a construir novas versões do *Theremin* e os seus populares sintetizadores, onde se destaca o *Etherwave Theremin* (apresentado na figura 2.3), tendo sido este inspirado na criação de León Theremin. Na figura 2.4 encontram-se alguns dos primeiros *Theremins* comercializados, assim como alguns actuais. Por outro lado, muitos entusiastas deste instrumento desenvolveram protótipos semelhantes ao *Theremin* original [Har06].



Figura 2.3: Fotografia de um Etherwave Theremin (obtida de [Mus08])



Figura 2.4: Exemplo de alguns Theremins comercializados

O *Theremin* deu início a uma nova frente de desenvolvimento de instrumentos, os hiper-instrumentos (ver 2.3). Rapidamente começaram a surgir instrumentos com a mesma base do *Theremin*, isto é, instrumentos que produzem sons sem contacto físico. Como exemplos

deste tipo de instrumentos tem-se:

- Celleto [Cha06];
- *LigthHarp* [S.96];
- Body Glove [Mas07].

Ao realizar uma pesquisa em www.youtube.com com os nomes destes instrumentos e do *Theremin*, encontram-se vários vídeos com demonstrações. Na página web referida anteriormente também podemos verificar a quantidade de bandas que actuam com um Theremin. Mais uma vez, pode-se afirmar que existe um culto pelo Theremin.

2.3 Hiper-instrumentos

O hiper-instrumento, assenta numa filosofia diferente dos instrumentos tradicionais. Mas esta é bastante discutida, existindo várias opiniões sobre o tema. Inclusive decorre anualmente uma conferência sobre as novas vertentes da música - ICMA's annual International Computer Music Conference [ICM07].

A estrutura dos dispositivos classificados como hiper-instrumentos, corresponde ao diagrama apresentado na figura 2.5 [G.97].

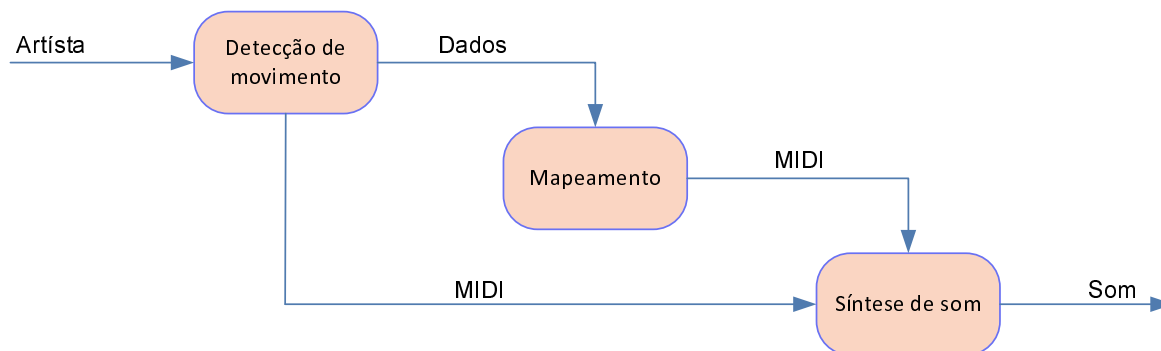


Figura 2.5: Diagrama ilustrativo da estrutura de um hiper-instrumento

Como se pode verificar na figura referida, o funcionamento de um hiper-instrumento baseia-se em 3 blocos modulares. O bloco “*detecção de movimento*” detecta o movimento do artista e transforma-o em dados. Em seguida, o bloco “*mapeamento*” interpreta os dados obtidos do bloco anterior e mapeia-os tendo em vista uma relação entre o movimento e a síntese de som. Por fim, o bloco “*síntese de som*” recebe os dados provenientes do bloco “*mapeamento*”, ou directamente do bloco “*detecção de movimento*”. A partir destes blocos,

é realizada a síntese do som que vai ser enviado para o ouvinte (neste bloco também poderá ocorrer síntese de imagem/cor). A comunicação entre os dois últimos blocos é normalmente realizada através do MIDI 2.3.2. Os blocos referidos podem ser compostos por diferentes elementos:

- Detecção de movimento - sensores ultra-sons, sensores infravermelhos, sensores electro-magnético, imagem;
- Mapeamento - Conversores MIDI, software de edição (*MAX*), *STEIM's BigEye*, Software específico de mapeamento, algoritmos específicos (processamento com DSP);
- Síntese de som - Módulos de MIDI, *samplers*, sintetizadores.

Para além do mapeamento do movimento, o conceito de hiper-instrumento (expansão de um instrumento convencional) permite abarcar outro tipo de associações, com o intuito de estimular simultaneamente vários sentidos. Um exemplo claro é associação entre som e imagem e em particular entre som e cor. Um assunto de interesse neste contexto (mas que não será aqui aprofundado) é a mistura de sentidos, denominada *sinestesia*, que se manifesta e é explorada na obra de artistas como Kandinsky [Har02], Scriabin [SSoA00] ou Messiaen [Bal01].

2.3.1 Associação entre som e cor

A associação entre o som e a cor foi um tema abordado muito antes do aparecimento do conceito de hiper-instrumentos. Por volta de 1730, o Padre Louis Bertrand Castel construiu o primeiro órgão de cores. Este instrumento era constituído por 60 janelas de vidro colorido iluminadas por velas, com pequenas cortinas. Quando se carregava numa tecla do órgão, para além do som produzido, abria-se a cortina da janela colorida correspondente (como explicado em [McD06]).

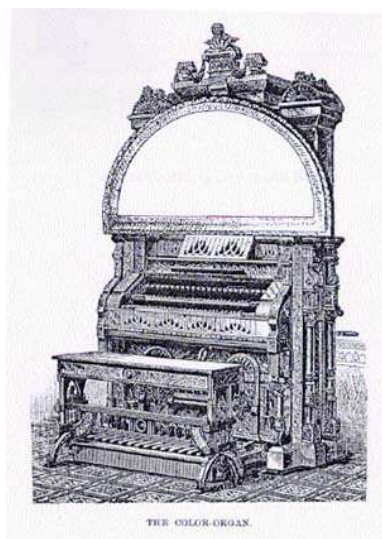
Ao longo do tempo, o conceito do órgão de cores continuou em evolução. Bainbridge Bishop, por volta de 1880, apresentou a sua versão (fig 2.6a), assim como Wallace Rimington, em 1915 (fig 2.6b). Esta última versão já recorria à electricidade para a projecção da luz.

Acompanhando o desenvolvimento de vários órgãos de cores, também foram desenvolvidas escalas de cor, associando as cores às notas musicais. Na figura 2.7 encontra-se um resumo cronológico.

Actualmente, com a versatilidade dos sistemas baseados em DSP e o aparecimento dos LED RGB é possível recriar e desenvolver o conceito de Castel de uma forma particularmente simples.

2.3.2 MIDI

MIDI é o acrónimo de *Musical Instrument Digital Interface*. Apesar do seu impacto no mundo da música o MIDI não é uma linguagem musical, nem descreve sons musicais [J.95]. O



(a) Órgão de cores construído por Bainbridge Bishop



(b) Órgão de cores construído por Wallace Rimington

Figura 2.6: Imagens dos primeiros órgãos de cores (imagem obtida de [McD06])

			Três séculos de escalas de cor											
			C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Isaac Newton	1704		Red		Orange		Yellow	Green		Blue		Purple		Pink
Louis Bertrand Castel	1734		Blue	Green	Yellow	Orange	Red	Blue	Green	Yellow	Orange	Red	Blue	Green
George Field	1816		Blue		Purple		Red	Orange		Yellow		Green		Blue
D. D. Jameson	1844		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
Theodor Seemann	1881		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
A. Wallace Rimington	1893		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
Bainbridge Bishop	1893		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
H. von Helmholtz	1910		Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink
Alexander Scriabin	1911		Red	Pink	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
Adrian Bernard Klein	1930		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
August Aeppli	1940		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
I. J. Belmont	1944		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue
Steve Zieversink	2004		Yellow	Green	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Purple	Pink

Figura 2.7: Três séculos de escalas de cores (imagem obtida de [Col04])

MIDI consiste num protocolo de comunicação que representa um acordo entre fabricantes de equipamentos musicais, computadores e software que permite a troca de informação e sinais de controlo. Pode-se entender o MIDI como uma pauta musical, uma vez que o MIDI apenas representa a informação para efeitos de armazenamento ou transmissão, isto é, no MIDI é descrita a informação necessária para a geração de som pretendido. Por outro lado, uma gravação contém a informação da reprodução. Diferentemente de outros formatos (como o formato *WAV* e *MP3*), um arquivo MIDI não contém o áudio propriamente dito, mas sim as

instruções para produzi-lo, isto é, o arquivo é como se fosse uma partitura, mas com muito mais informação. Essas instruções definem os instrumentos, notas, timbres, ritmos, efeitos e outras características que serão utilizadas por um sintetizador para a geração dos eventos musicais. O MIDI, em termos técnicos, é protocolo assíncrono com uma interface série, em que os seus parâmetros são:

- *baud rate* de 31250;
- tramas de 10 bits;
- um *start bit*;
- um *stop bit*;
- oito *bits* de informação.

A troca de informação entre dispositivos mencionada em cima, é realizada através de mensagens MIDI (os 8 bits de informação referidos anteriormente). As mensagens podem ser constituídas por 1 a 3 bytes. Existem vários tipos de mensagens para diversos fins. Nos diagramas das figuras 2.8 e 2.9, encontram-se descritos os tipos de mensagens existentes. As mensagens MIDI estão separadas em três grupos distintos:

- *System common* - mensagens que destinam-se à troca de informação de configuração e controlo entre dispositivos MIDI;
- *Voice* - mensagens para um dos 16 canais MIDI, onde se transporta informação acerca da *performance* musical;
- *System Realtime* - mensagens com um só byte (status) que é responsável pela sincronização de dispositivos MIDI, em que estas têm de ser enviadas e recebidas em intervalos de tempo bem definidos.

O bloco com reticências (figura 2.8) representa a panóplia de mensagens disponíveis deste tipo, como por exemplo: *Portamento*, *Attack Time* e *Release Time*. O livro [J.95], contém uma descrição exaustiva de todos os tipos de mensagens existentes no protocolo MIDI e a descrição da interface ao nível do *hardware*.

Para o desenvolvimento deste projecto, apenas as mensagens do tipo *Voice*, foram consideradas. Neste tipo de mensagens existem outras mensagens disponíveis: *Note On*, *Note Off*, *Controler*, *Program Change*. Apresenta-se a descrição das principais mensagens na figura 2.8.

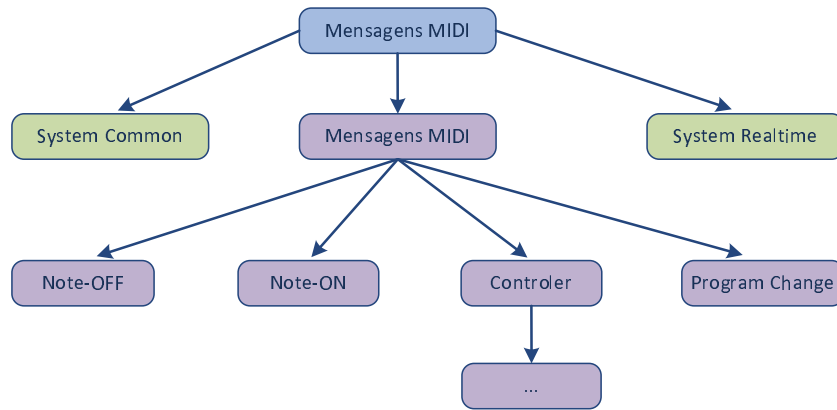


Figura 2.8: Tipos de mensagens MIDI

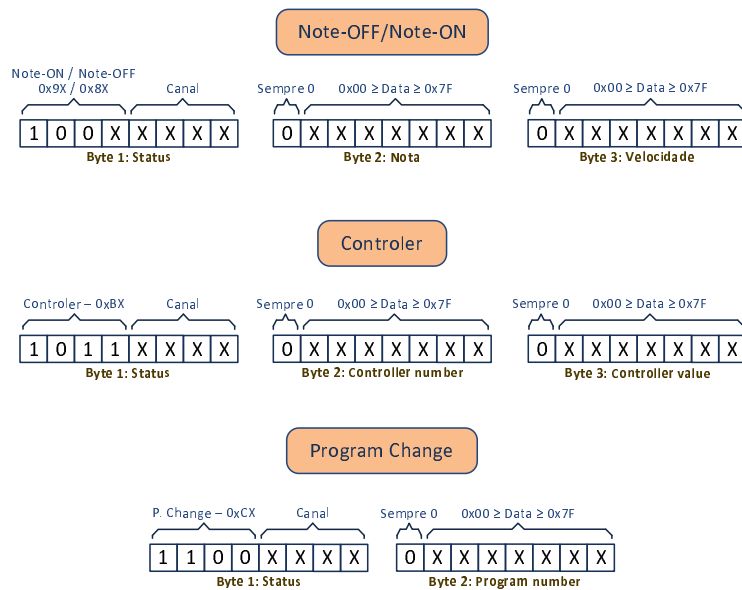


Figura 2.9: Descrição das mensagens MIDI

2.3.3 MAX

O MAX [7408] é um software que consiste num ambiente de programação mais simples e objectivo que as linguagens de programação tradicionais, baseadas em linhas de comandos, uma vez que, se utilizam blocos com funções específicas que podem ser interligados de modo a realizarem um objectivo pré-definido.

O nome do programa é uma homenagem a Max V. Mathews e foi criado no [Institut de Recherche et Coordination AcoustiqueMusique \(IRCAM\)](#) no final dos anos 80 por Miller Puckette. Posteriormente David Zicarelli preparou uma versão para Macintosh, actualmente

comercializada pela empresa Cycling'74.

O MAX, actualmente é complementado com o pacote MSP, em que este adiciona ao MAX a possibilidade de realizar tratamento de áudio digital e operações de [DSP](#) em tempo real, dentro do próprio programa. O MAX juntamente com o MSP veio modificar a forma como o computador interfere nos processos de composição e performance musical. Em primeiro lugar, possibilitou a coexistência, num ambiente comum, de ferramentas ligadas a processos de estúdio (processos de síntese, manipulações espectrais, processos formais de composição) e ferramentas ligadas à performance (controlo de parâmetros sonoros e composicionais em tempo real). Desta forma, o computador transforma-se numa espécie de instrumento genérico de produção e performance musical. Esta secção foi escrita tendo por base o artigo correspondente à referência [F.].

Capítulo 3

Medição da posição da mão com Ultra-Sons

3.1 Introdução

Nos dias de hoje, os ultra-sons são utilizados em muitas e variadas aplicações, sendo as mais conhecidas, a detecção de obstáculos e a detecção de movimentos. Curiosamente, este fenómeno na natureza é já um meio utilizado para a detecção de obstáculos, utilizado pelos morcegos para conseguir evitar estes durante a noite.

Este ser vivo emite uma onda ficando à espera de um eco proveniente de um obstáculo, determinando assim, a distância a que se encontra deste, pela diferença de tempo entre o envio da onda e a recepção do eco.

Neste capítulo será apresentado o processo de detecção de obstáculos a partir dos ultra-sons e todos os problemas inerentes. Na secção “Sinais utilizados e técnicas de processamento” serão descritos alguns sinais utilizados na detecção de obstáculos e alguns dos métodos mais conhecidos, sendo ainda descritas algumas técnicas para melhorar a precisão das medições em ultra-sons.

Na secção seguinte “Ensaio preliminares” serão abordados alguns testes realizados durante o decorrer deste projecto e, por fim serão apresentadas algumas soluções desenvolvidas para resolver os problemas encontrados na execução dos referidos testes descritos na secção “Soluções implementadas e resultados”. É necessário referir que alguns pontos serão implicitamente abordados de acordo com o objectivo deste projecto.

3.2 Ultra-sons na detecção de obstáculos

Na aplicação de ultra-sons para a detecção de obstáculos são utilizados dois métodos. Um método determina a distância do obstáculo através do tempo de voo, isto é, o tempo que decorre entre o caminho da onda e a recepção do eco. Desta forma, a expressão utilizada será dada por $d = v_{Som} \times t_{Voo}$.

O outro método, diferença de fases, consiste em medir o desfasamento que a onda sofre até chegar ao receptor. Este método apresenta resultados mais precisos, mas apenas para pequenas distâncias, na ordem do valor do comprimento de onda.

De realçar que, para além dos métodos atrás descritos, existem outros desenvolvimentos nesta área, tal como o método apresentado por Francis Gueuning [GF96]. Para o desenvolvimento deste projecto, foi escolhido o método pelo tempo de voo.

3.2.1 Propagação dos ultra-sons no ar

Uma das características da propagação dos ultra-sons no ar é a sua velocidade, está varia de meio para meio, e pode oscilar entre os $300m/s$ até aos $5000m/s$.

Neste projecto o único meio considerado, será o ar. Assim, tem-se a aproximação em 3.1

$$v_{som} = 331.3 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.15}} \quad (m/s) \quad \theta - \text{Temperatura do ar} \quad (3.1)$$

Apesar da velocidade variar consoante a temperatura, neste projecto, não se considera esta variável, porque o objectivo é realizar medidas com elevada precisão e não exactidão, em que a variação da velocidade não é relevante para o sistema, dado que as medidas são relativas e não absolutas. Assim, considera-se o valor de $343m/s$ para a velocidade do som. O cálculo da distância é obtido segundo a expressão 3.2

$$F_s = 160KHz$$

$$T_s = \frac{1}{F_s}$$

$$d = \frac{I_P - N}{F_s} \times v \quad \begin{array}{ll} I_P & - \text{índice da amostra de pico;} \\ N & - \text{número de amostras;} \\ F_s & - \text{frequência de amostragem.} \\ v & - \text{velocidade do som.} \end{array} \quad (3.2)$$

A determinação da distância possui um erro associado, determinado pela expressão 3.4. Uma vez que só o índice da amostra varia, considera-se que é a única variável que contribui para a propagação do erro ($\Delta I_P = 1$). Assim, obtêm-se a expressão para o erro associado à distância:

$$\Delta d = \left| \frac{\partial d}{\partial v} \right| \times \Delta v + \left| \frac{\partial d}{\partial I_P} \right| \times \Delta I_P + \left| \frac{\partial d}{\partial F_s} \right| \times \Delta F_s \quad \begin{array}{ll} I_P & - \text{índice da amostra de pico;} \\ v & - \text{velocidade do som;} \\ F_s & - \text{frequência de amostragem.} \end{array} \quad (3.3)$$

$$= \frac{v}{f_s} \times \Delta I_P = 2.1mm \quad (3.4)$$

Neste contexto, é necessário ter algumas noções sobre a propagação das ondas ultrasónicas, tal como a atenuação da onda aquando da sua propagação no ar.

A figura 3.1 apresenta um gráfico ilustrativo da variação da atenuação em função da humidade do ar e da temperatura. Numa breve análise, verifica-se a não linearidade da variação, pelo que a atenuação é um factor importante, na medida em que limita a distância máxima entre um emissor e um receptor.

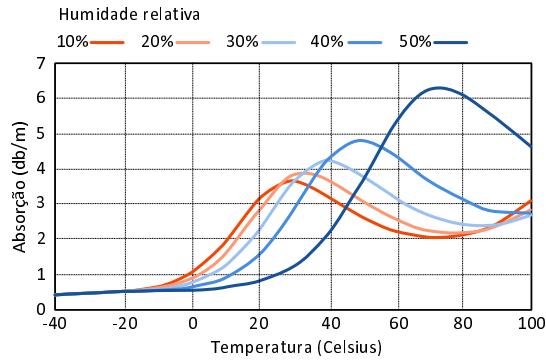


Figura 3.1: Atenuação de um sinal de ultra-sons a 100 KHz para 1 atm (fonte: Airmar Technology Corporation)

3.2.2 Modelo das reflexões

Neste projecto, tendo em conta o referido anteriormente e o objectivo de se detectar a posição da mão de forma precisa, é necessário recorrer ao método mencionado em 3.2, que consiste no tempo de voo dado pela expressão mencionada na mesma secção.

O modelo em que se desenvolverá o projecto será o apresentado na figura 3.2. Consiste num emissor, num receptor e na mão (obstáculo a detectar). De modo a quantificar o sinal absorvido pela mão, quando a onda reflecte nesta, fez-se uma pesquisa neste sentido.

Foi encontrado um artigo [B.00] que menciona a absorção da pele, como pretendido. Apesar do referido, não é possível definir a absorção exacta, uma vez que os resultados apresentados no artigo, só se referem à gama das frequências audíveis (absorção pela pele, para 20 KHz - $\alpha = 0.004$).

3.3 Sinais utilizados e técnicas de processamento

Para a detecção de obstáculos utilizando ultra-sons, é necessário escolher, em primeiro lugar, o sinal que vai ser utilizado. É importante realizar uma escolha cuidada, dado que será este o sinal que se irá reflectir nos obstáculos. Após a reflexão num obstáculo é recebido um eco do sinal emitido e realizada a detecção de pico. É neste ponto que algumas características do sinal enviado são importantes, uma vez que, como foi mencionado em 3.2, o sinal sofre

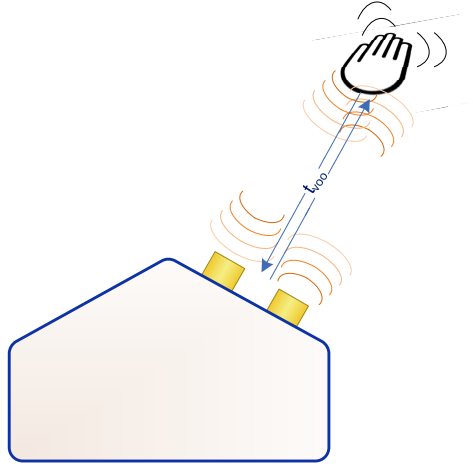


Figura 3.2: Diagrama ilustrativo do modelo das reflexões

bastante degradação. Características como resistência a interferências do ruído, possível detecção de sinais de muito baixa amplitude, entre outras, são determinantes na detecção de pico. Como sinais estudados, foram considerados o chirp e a sinusóide.

3.3.1 Chirp e filtro óptimo

O *chirp* é um dos sinais mais utilizados nas aplicações de ultra-sons, uma vez que apresenta algumas características referidas anteriormente, tal como a resistência a interferências do ruído. Este sinal apesar de ser mais complexo, quando aliado a algumas técnicas de processamento de sinal, produz bons resultados. O *chirp* é um sinal, que pode ser interpretado como uma sinusóide que varia linearmente ao longo do tempo, desde uma frequência inicial ω_1 até à frequência ω_2 [VJ]. A expressão matemática que define este sinal é a seguinte:

$$c(t) = h(t)\cos(\omega_1 + \beta t^2), \quad t \in [0, T] \quad (3.5)$$

$h(t)$ - janela de Hamming
 $\beta = (\omega_2 - \omega_1)/(2T)$
 T - Duração do chirp

Na figura 3.3 encontra-se o exemplo de um *chirp* obtido utilizando a expressão anterior.

Como método de medição do atraso do eco em relação ao sinal enviado, estudou-se uma técnica baseada no filtro óptimo. A aplicação do filtro óptimo a um sinal consiste na convolução de um sinal de entrada (recorrendo ao uso de um filtro **Finite Impulse response (FIR)** [IE93]), $c[n]$ (obtido em 3.5) com $h[n]$ que representa a resposta impulsional do filtro (coincide com o sinal a detectar). O uso desta técnica tira partido do conhecimento do sinal que se está a enviar. A expressão 3.6 traduz o que foi referido.

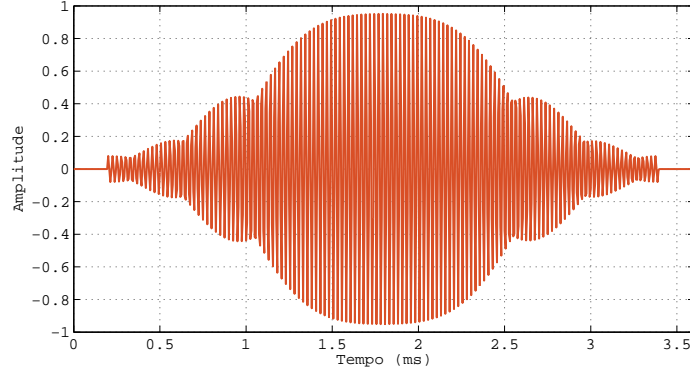


Figura 3.3: Chirp sintetizado no matlab

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)c(k-n) \quad (3.6)$$

A aplicação do filtro óptimo não é mais do que a correlação cruzada [IE93] do sinal recebido com o sinal enviado, como demonstrado no artigo [VJ]. Se o sinal recebido for igual ao sinal enviado, então estamos perante uma auto-correlação, traduzida pela expressão 3.7

$$R_{cc}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} c(n)c(n+k) \quad (3.7)$$

Assim, o valor máximo da saída do filtro óptimo ($y[k]$) ocorre na amostra N . Daqui se conclui que o atraso provocado pelo filtro óptimo é correspondente ao número de amostras do sinal enviado.

3.3.2 Sinusóide e filtro passa-banda

A alternativa ao sinal referido anteriormente é a sinusóide. O sinal sinusoidal é utilizado em sistemas onde a unidade de processamento não possui grande capacidade de cálculo, tipicamente microcontroladores. Quando se escolhe este tipo de sinal, a técnica utilizada para a detecção de pico consiste na aplicação de um filtro passa-banda ao sinal recebido. Assim, tem-se:

$$s(t) = \sin(wt + \phi) \quad \begin{array}{l} w - \text{frequência pretendida} \\ \phi - \text{desfasamento} \end{array} \quad (3.8)$$

Para a detecção do pico, é apenas realizado uma filtragem passa-banda. Para este efeito é utilizado um filtro **Infinite Impulse Response (IIR)** (maior simplicidade) [IE93], com as seguintes características (considerando f_s a frequência de amostragem):

- tipo - butter;

- ordem - 5;
- Banda de passagem - $[49..51]KHz$;
- Banda de rejeição - $[0...47]KHz$ e $[53...fs/2]$;

Os valores da banda de passagem e da banda de rejeição dependem da frequência da sinusóide utilizada. Os valores apresentados referem-se ao filtro utilizado nos testes apresentados em 3.4.4

3.3.3 Análise comparativa

Para se observarem as diferenças no uso destes dois tipos de sinal, vamos considerar a adição de ruído branco - $r[n]$. Deste modo, tem-se a figura 3.4.

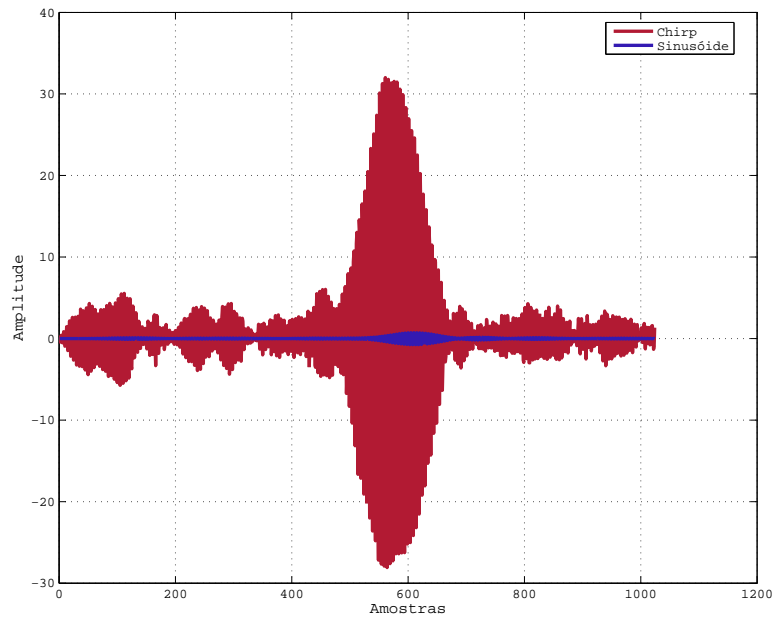


Figura 3.4: Comparação entre o *chirp* e a sinusóide

Verifica-se a vantagem do filtro óptimo, uma vez que, para a mesma amplitude de sinal, se obtém um pico com maior energia. Este facto foi explicado em 3.3.1.

3.4 Pré-projecto

Antes de se projectar o sistema para o desenvolvimento de um Theremin ultra-sónico, foi necessário realizar testes para determinar alguns problemas associados à utilização de ultra-sons. Também se testou o *hardware* existente, proveniente de trabalhos anteriores relacionados com o projecto “*LocUS*”, tal como o *software* (consultar anexo A.1).

3.4.1 *Setup* experimental e meio circundante

Para a realização dos testes necessários foi construída uma estrutura em madeira. Esta estrutura teve como objectivo criar um ambiente controlável, permitindo a repetitividade dos ensaios realizados. Como se pode verificar na figura 3.5, esta estrutura é constituída por uma escala e um fio. Estes acessórios permitem a colocação dos obstáculos à distância pretendida (distância ente os sensores ultra-sons e o obstáculo).

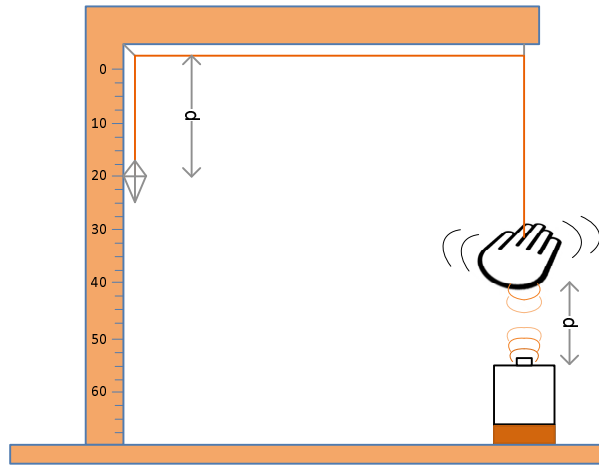


Figura 3.5: Fotografia do *setup* experimental construído

Para a completa caracterização dos resultados, tem de se ter em consideração o meio circundante, pois as reflexões deste poderão influenciar os testes realizados. Na figura 3.6 encontra-se a descrição sucinta do meio.

3.4.2 Metodologia dos ensaios

Com a estrutura descrita em 3.4.1, foi possível realizar vários testes, de onde se puderam retirar muitas conclusões. Este *setup* permitiu realizar testes de forma repetitiva, pois facilmente se mantinham as condições entre os vários testes. Este factor é muito importante na medida em que, para comparar resultados, é necessário que estes tenham sido obtidos nas mesmas condições.

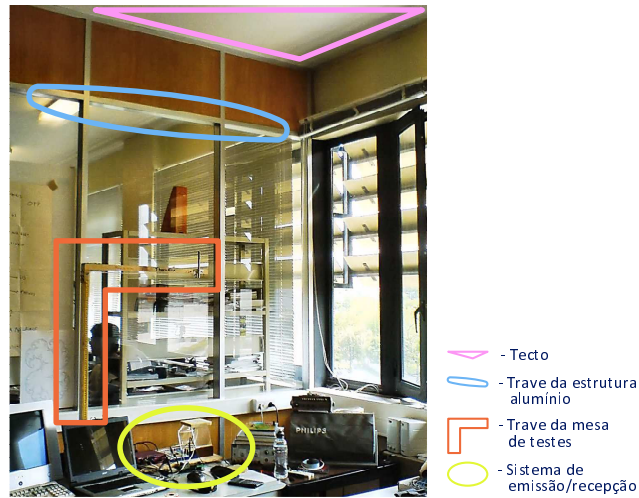


Figura 3.6: Diagrama ilustrativo do meio circundante

Grande parte dos testes, foi realizada da mesma forma, isto é, foram obtidos vários sinais na saída da [Analog-to-Digital Converter \(ADC\)](#) com o *Code Composer Studio* para distâncias pré-definidas: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros. As condições do ambiente criado estão ilustradas na figura 3.7.



Figura 3.7: Fotografias ilustrativas do ambiente criado

Após a obtenção dos sinais, elaborou-se um script matlab para a análise destes. Como sinais enviados, foram utilizados os descritos em 3.3 (sinusóide e *chirp*). Neste *script* realizou-se todo o processamento necessário para a detecção da posição da mão, para as duas situações. Este processamento está de acordo com o diagrama de blocos apresentado na figura 3.8.

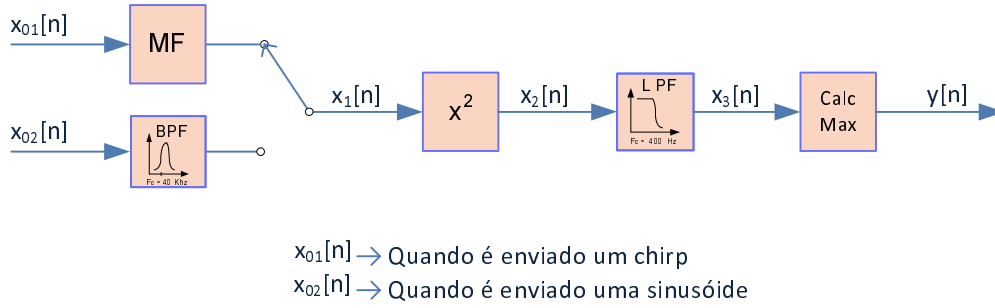


Figura 3.8: Diagrama de blocos relativo ao processamento realizado no matlab

3.4.3 Escolha de sensores

Dos sensores disponíveis no laboratório, existiam dois modelos com características satisfatórias para a aplicação em causa. Estes modelos são: o emissor *400ST-160* juntamente com o receptor *400SR-160* e o par emissor/receptor *500MB120*, apresentados na figura 3.9. Realizaram-se testes preliminares de modo a decidir que modelo de sensores iria ser utilizado (no link mencionado [LOC07] encontra-se a descrição de todos os testes realizados, tal como os resultados obtidos).



Figura 3.9: Fotografia dos sensores testados

Perante a análise dos gráficos, verificou-se que os sensores do modelo *400S-160*, apresentam melhores resultados. Os sensores do modelo *500MB120* apresentam uma atenuação no centro do pico recebido. Não foi possível determinar a verdadeira causa desta particularidade, no entanto supõem-se que terá tido origem em questões de *hardware*. Por outro lado, verificou-se que os sensores em causa são mais susceptíveis ao ruído.

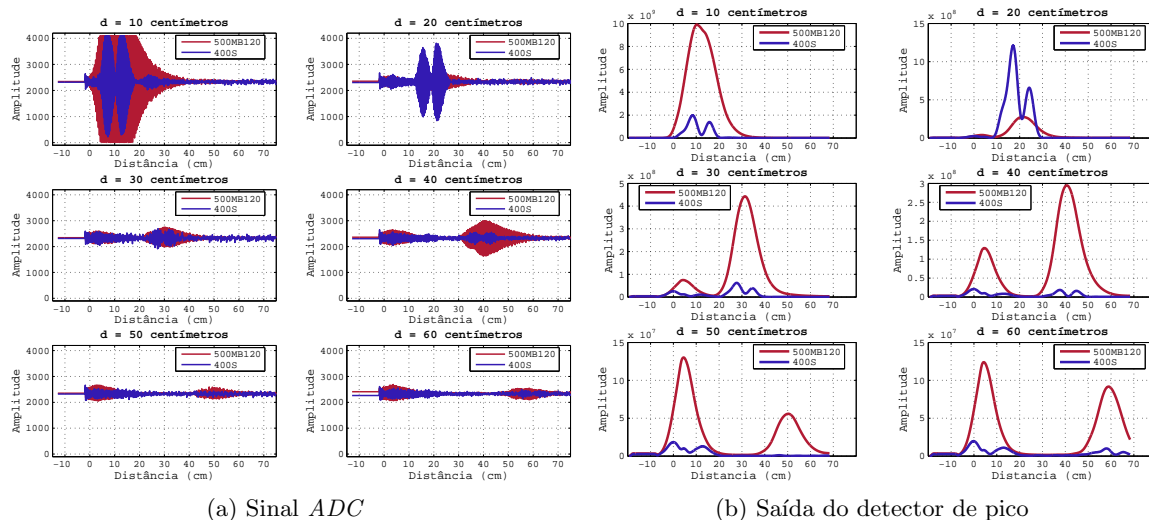


Figura 3.10: Resultados obtidos com os dois tipos de sensores

3.4.4 Aquisição com hardware existente

Após uma breve análise ao hardware existente, verificaram-se alguns problemas. Para os caracterizar, bem como as suas causas, realizaram-se vários testes segundo a metodologia descrita em 3.4.2. Foram utilizados dois tipos de obstáculos, a mão e uma superfície, apresentados nas figuras 3.11a e 3.11b.

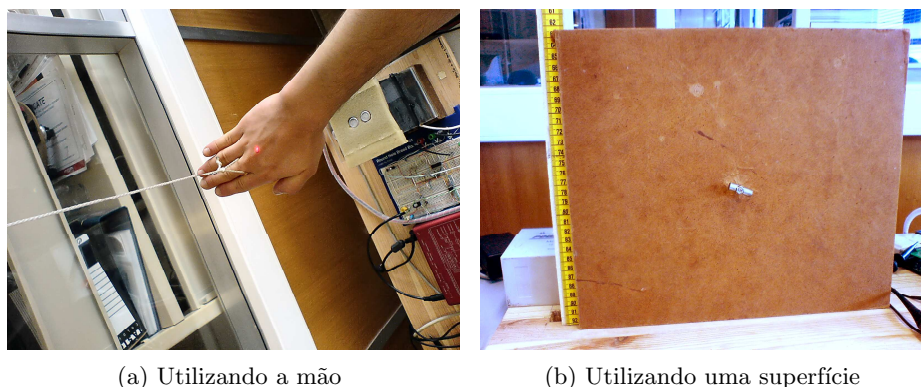


Figura 3.11: Obstáculos utilizados

Para além do objectivo referido anteriormente, também foi pretendido estudar o melhor sinal a utilizar e o número de amostras deste.

Desta forma, realizaram-se os testes apresentados na tabela 3.1

Sinais	64 Amostras	128 Amostras	Sensores	Obst.
<i>Chirp</i>	ADCMaoChirp64.mat(1)		500MB120	Mão
		ADCMaoChirp128.mat(2)	400S – 160	Mão
		ADCSuperChirp128.mat(3)	400S – 160	Sup.
<i>Sinusóide</i>	ADCMaoSinu64.mat(4)	ADCMaoSinu128.mat(5)	500MB120	Mão
		ADCSuperSinu128.mat(6)	500MB120	Sup.

Tabela 3.1: Testes realizados e respectivos ficheiros

Resultados obtidos

Para uma fácil referência aos testes efectuados, os testes apresentados na tabela 3.1, encontram-se numerados.

Os resultados dos testes 1 e 4, encontram-se apresentados nas figuras 3.12 e 3.13.

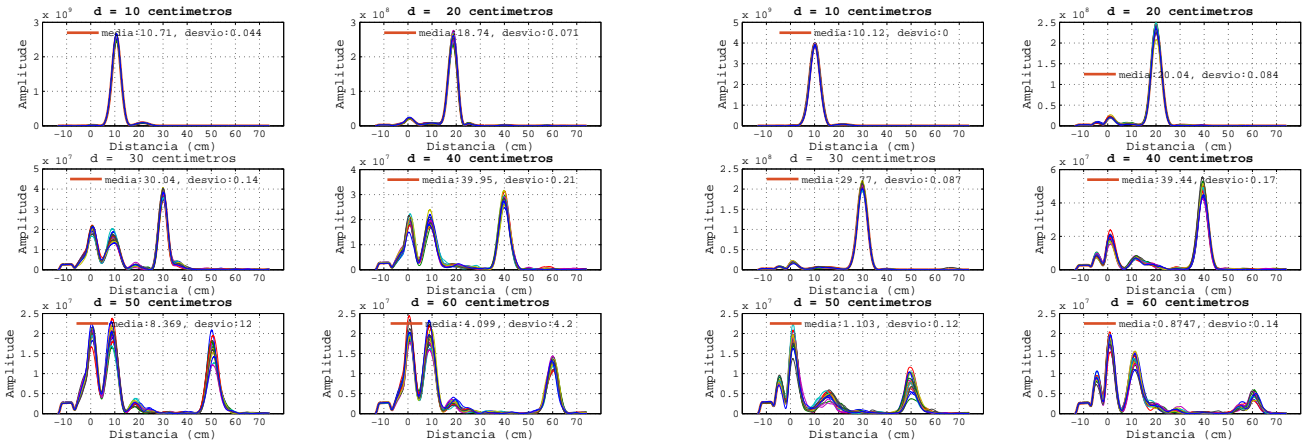


Figura 3.12: Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 1 e 4

Quando se utilizam sinais de 64 amostras, os resultados dos dois testes revelam uma grande semelhança, pois um *chirp* com este número de amostras é, aproximadamente, uma sinusóide. No uso deste sinal, verificou-se que este contém pouca energia. Para a situação em que se utilizam sinais de 64 amostras, existe uma grande semelhança nos resultados dos dois testes. Visto que, um *chirp* de 64 amostras é aproximadamente uma sinusóide. Referindo o uso de 64 amostras, verifica-se que o sinal contém pouca energia.

Nos testes 2 e 3, obtiveram-se os resultados das figuras 3.14 e 3.15.

Os resultados dos testes 3 e 4 tornaram-se interessantes do ponto vista da análise das reflexões dos ultra-sons. Verificou-se que a mão, sendo uma superfície não plana, reflecte muito menos sinal que a superfície utilizada. Para além do referido, o coeficiente de reflexão

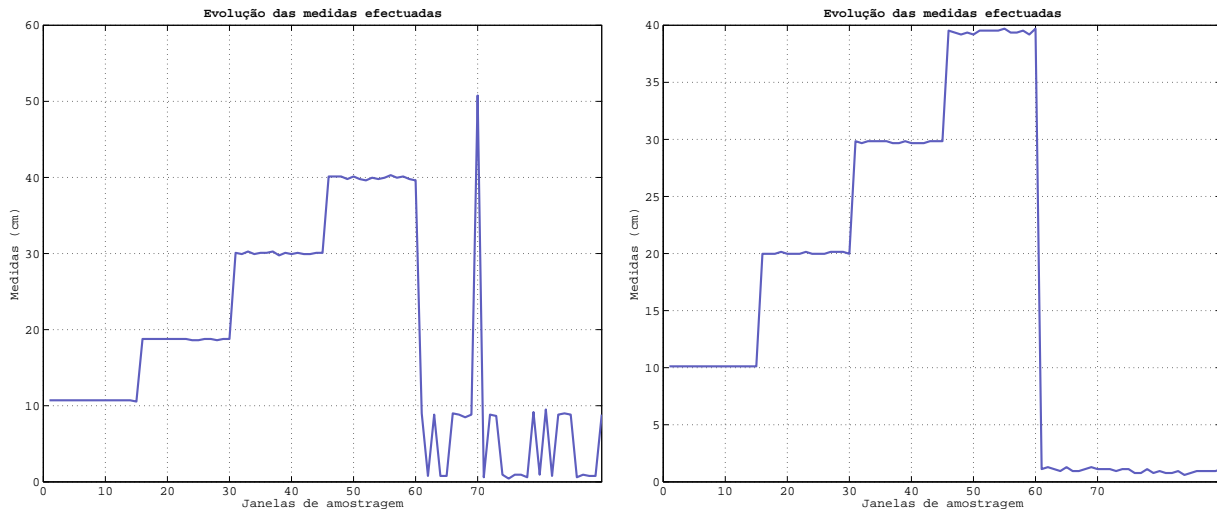


Figura 3.13: Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 1 e 4

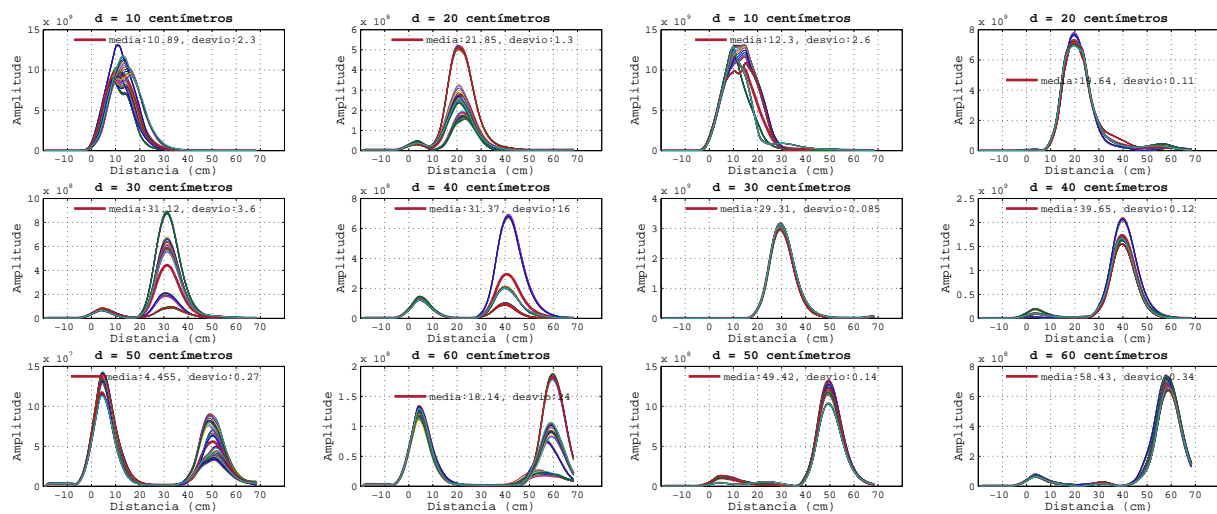


Figura 3.14: Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 2 e 3

também influenciou o resultado final.

Os resultados menos satisfatórios obtidos no teste 2, tiveram como principal causa o *cross-talk* (mencionado em 3.4.7). Verifica-se que a energia deste, para as distâncias maiores, é superior à energia do eco recebido, originando medições erradas da distância. Torna-se necessário referir a variação das medições para 10 centímetros. Esta variação é justificada pelo *overflow* na *ADC*¹. Posteriormente, será necessário prevenir este acontecimento.

Os dados obtidos para os testes 5 e 6, podem ser observados nas figuras 3.16 e 3.17 os

¹Ocorre quando na entrada da *ADC* se têm um sinal com uma amplitude superior à sua gama de valores

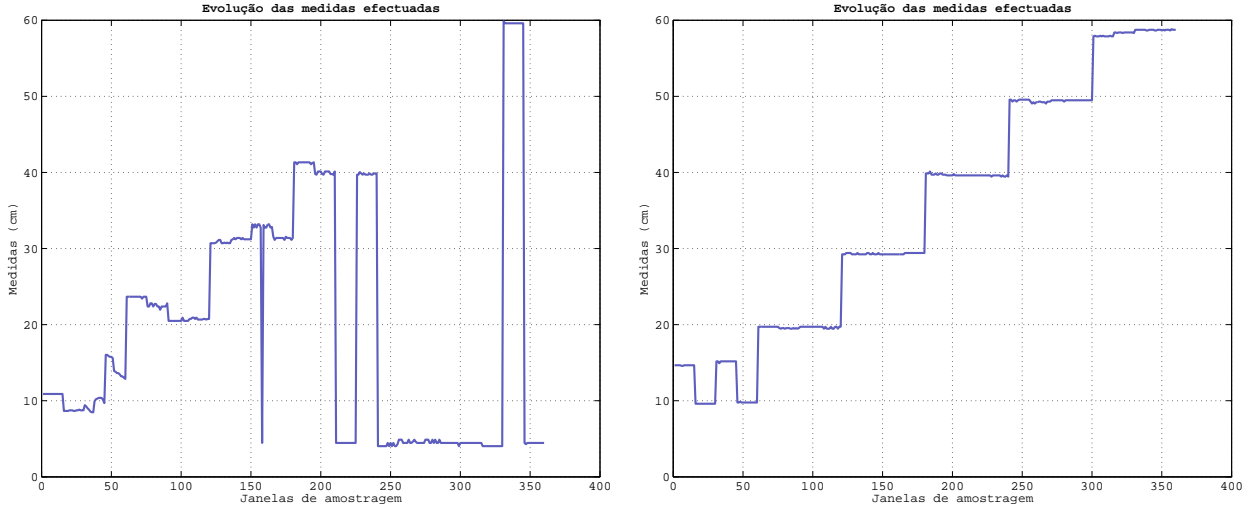


Figura 3.15: Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 2 e 3

dados obtidos.

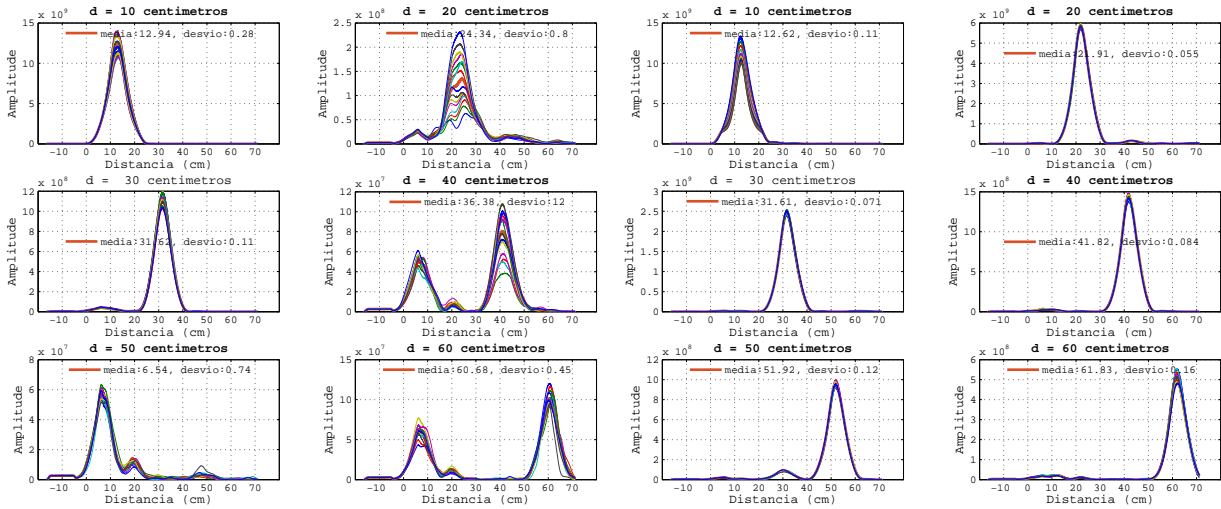


Figura 3.16: Gráficos do sinal $x_3[n]$ para os testes 5 e 6

Como era de esperar, os resultados para o teste 6 (superfície como obstáculo utilizado) foram bastante satisfatórios, tendo medições correctas. No teste 5, ocorre o principal problema referente ao uso de sinusóides, que consiste no desaparecimento do sinal quando a amplitude do eco é baixa. Caso se utilize um *chirp* com um filtro óptimo, por muito baixo que seja o sinal, o pico detectado tem sempre um valor de amplitude aceitável, dado que se toma partido do conhecimento do sinal emitido. No link mencionado em [LOC07] encontra-se o código *matlab* utilizado e uma descrição mais pormenorizada dos testes realizados.

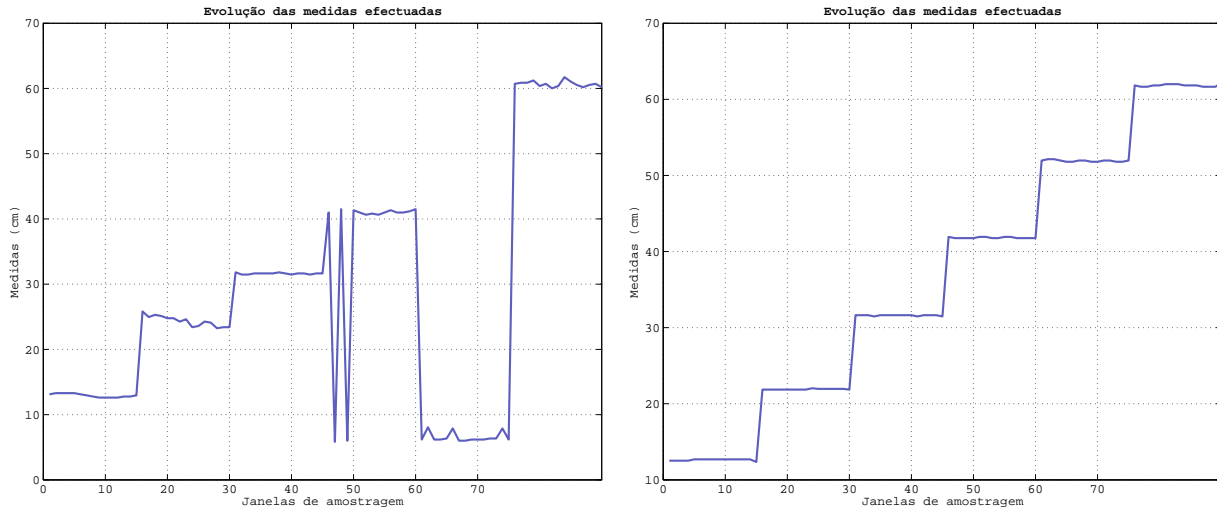


Figura 3.17: Gráficos do sinal $y[n]$ para os testes 5 e 6

3.4.5 Aquisição com a placa de som

No sentido de criar uma situação ideal para a detecção da posição da mão, efectuaram-se vários testes utilizando a metodologia descrita em 3.4.2, mas introduzindo algumas alterações no *hardware*, de modo a obter o menor nível de ruído possível². As alterações foram efectuadas segundo o diagrama de blocos da figura 3.18.

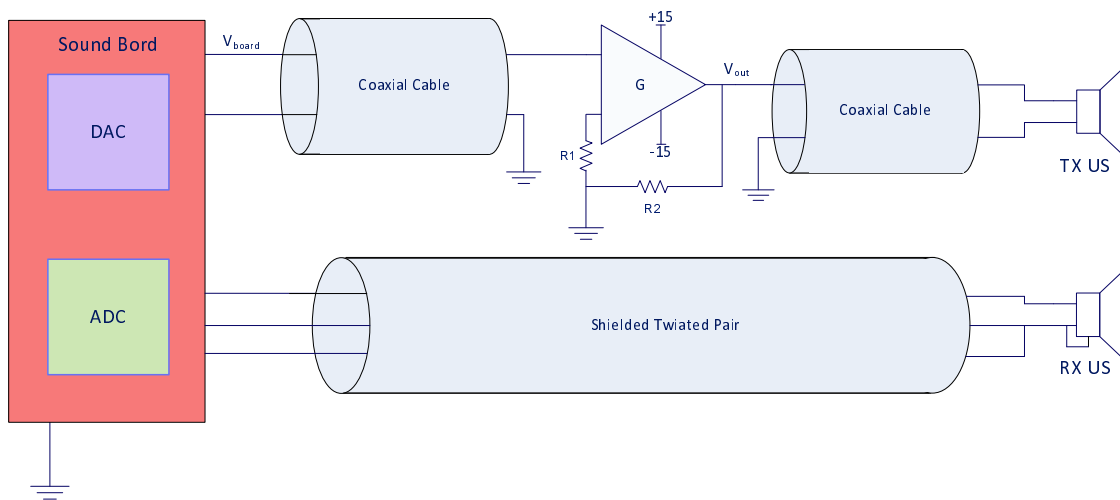


Figura 3.18: Diagrama de blocos do sistema implementado

²Todos os testes realizados estão descritos com maior pormenor no link mencionado em [LOC07]

Nestes testes, o envio e a recepção dos sinais de ultra-sons, estiveram a cargo de uma placa de som profissional *Edirol FA-66*, onde se utilizou o software “*Nuendo*” para a reprodução e gravação do sinal. A configuração utilizada está apresentada na figura 3.19, onde se podem encontrar os blocos constituintes.

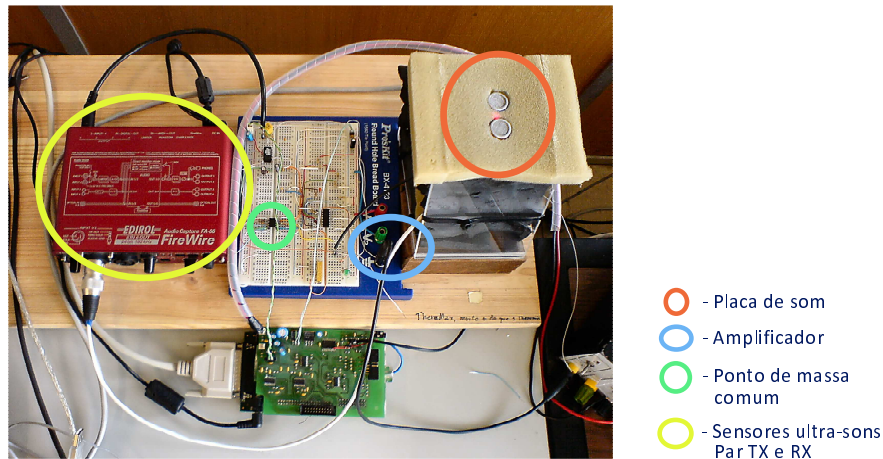
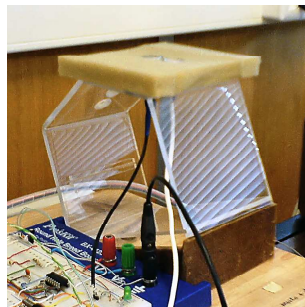


Figura 3.19: Diagrama de blocos do sistema implementado

O restante hardware está descrito nas figuras 3.21a, 3.21b e 3.21c. Nestes testes utilizaram-se cabos coaxiais, foram blindadas as ligações aos sensores e utilizou-se um ponto de massa comum, como se pode verificar pelo diagrama da figura 3.18 e pelas figuras mencionadas anteriormente.



(a) Estrutura para os sensores



(b) Emissor blindado



(c) Receptor blindado

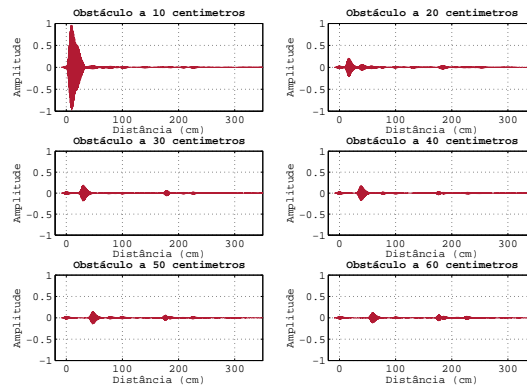
Figura 3.20: *Hardware* utilizado nos testes

Para os sinais enviados, fizeram-se algumas alterações em relação aos testes anteriores (3.4.4). Enviaram-se *chirps* de 128 amostras seguidos de um tempo de “*sleep*” de 200 milisegundos de modo a obter todos os ecos provenientes do meio circundante. Os ficheiros utilizados e as condições em que o teste foi realizado apresentam-se na tabela 3.2.

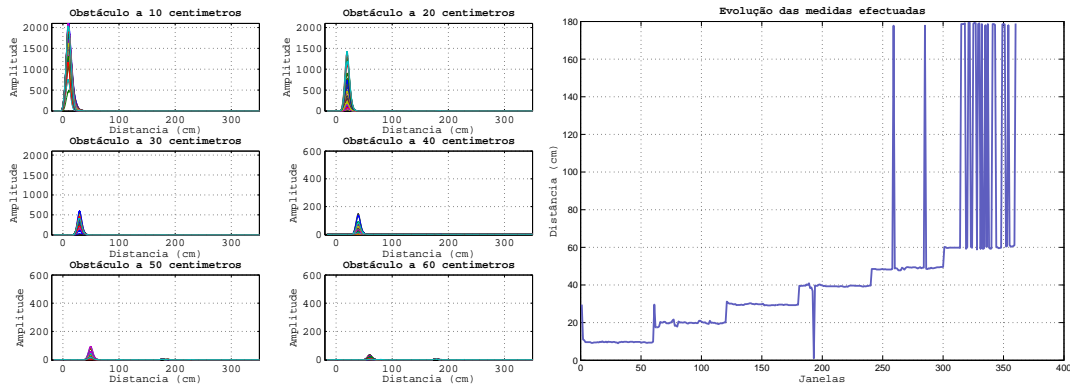
Condições	Obstáculo - Mão
	Sinal enviado - <i>Chirp</i>
	Amostras - 128
	Sensores - Par 400S-160
Medidas	Ficheiros
10	128_10_mat.wav
20	128_20_mat.wav
30	128_30_mat.wav
40	128_40_mat.wav
50	128_50_mat.wav
60	128_60_mat.wav

Tabela 3.2: Testes realizados e respectivos ficheiros

De seguida apresentam-se os resultados obtidos após o processamento dos sinais, conforme o diagrama de blocos apresentado na figura 3.8.



(a) Sinais obtidos com a placa de som



(b) Resultados obtidos após processamento

(c) Medições obtidas da posição da mão

Figura 3.21: Resultados dos testes da tabela 3.2

Verifica-se, pela análise dos gráficos, que se obtiveram medidas correctas da posição da mão, excepto para as últimas posições (50 e 60 centímetros). Em primeira análise, estes valores são explicados pelo baixo valor de ruído. Também é verificado que os ecos do meio circundante têm uma amplitude significativa, sendo por vezes, maiores que o eco proveniente da mão. Estes ecos serão estudados em 3.4.7

3.4.6 Aquisição com vários receptores

Durante a realização da aquisição com a placa de som (processo descrito anteriormente), foi possível verificar no software de aquisição (“Nuendo”) ausência de sinal de entrada. Ou seja, num determinado instante o sinal de entrada tinha a amplitude de aproximadamente -10 dB, no instante seguinte a amplitude do sinal era de -60 dB. Ao analisar este facto, percebeu-se que este comportamento corresponde a um fenómeno de cancelamento de sinal. Este fenómeno é explicado pela superfície irregular da mão e pelas rugosidades que esta apresenta - o comprimento de onda tem a mesma ordem de grandeza que a distância das rugosidades, como se pode verificar pela expressão 3.9.

$$F_{US} = 40KHz$$

$$v_{som} = 343m/s$$

$$\lambda_{US} = \frac{v_{som}}{F_{US}} = 0.008m$$

λ_{US}	—	comprimento de onda dos ultra-sons;	(3.9)
v_{som}	—	velocidade do som;	
F_{US}	—	frequência dos ultra-sons.	

Para contornar este fenómeno decidiu-se desenvolver um sistema que criasse diversidade espacial, baseado na utilização de vários receptores. Na figura 3.22a está representado o método desenvolvido. Este é constituído por três receptores. Desta forma, obtemos três sinais que serão somados após a filtragem. Como se pode analisar no diagrama apresentado em 3.22b, este método permite obter um sinal válido mesmo que ocorra o fenómeno de cancelamento.

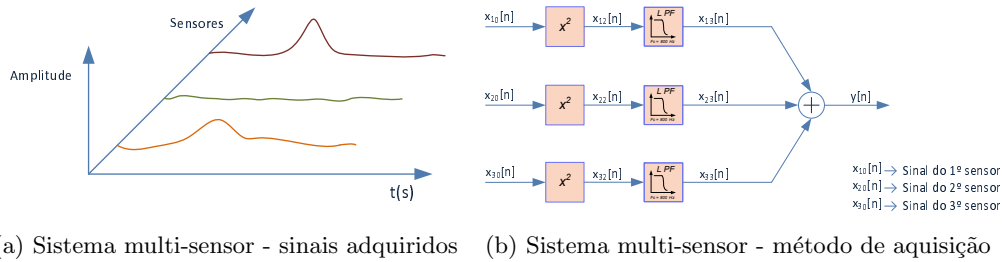


Figura 3.22: Sistema desenvolvido para criar diversidade espacial

3.4.7 Estudo de interferências

Com base no hardware descrito na secção anterior (3.4.5), realizaram-se alguns estudos sobre as interferências originadas quer pelo meio circundante, quer pelas reflexões das ondas ultra-sónicas. Para este efeito, realizaram-se alguns testes sem obstáculos em situações diferentes. Os vários testes estão representados na tabela 3.3. As condições em que os testes foram realizados correspondem a quatro classificações:

- **Normais** - Condições equivalentes aos testes anteriores;
- **Blindagem e Isolamento** - Blindagem das ligações dos sensores e colocação de esponja dentro da estrutura;
- **Placa a 45°** - Colocação de uma placa que faz um ângulo de 45° entre a normal do plano dos sensores e o plano da superfície;
- **Sensores a 30°** - Colocação dos sensores de forma a que o plano destes realize um ângulo de 30° com a superfície.

Condições	Obstáculo - Nenhum	
	Sinal enviado - <i>Chirp</i>	
	Amostras - 128	
	Sensores - Par 400S-160	
Testes	Ficheiros	Condições
1	128Test_mat	normais
2	128TesteBlin_mat	Blindagem e Isolamento
3	128Teste45_mat.wav	Placa de 45°
4	128Teste30_mat.wav	Sensores a 30° e placa de 45°

Tabela 3.3: Testes realizados e respectivos ficheiros

Apresenta-se os resultados destes testes na figura 3.23

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os resultados foram melhorando consoante as alterações, tendo em conta que o resultado ideal seria o não aparecimento de ecos:

- Primeira medição - captação dos ecos do meio circundante e *cross-talk*³ (identificados na figura 3.24);
- Segunda medição - atenuação de 27dB do *cross-talk* em relação à primeira medição;
- Terceira medição - atenuação de 37dB do *cross-talk* em relação à primeira medição e uma pequena atenuação de ecos mais distantes;
- Quarta medição - situação quase ideal, onde os ecos existentes na primeira medição desapareceram e o *cross-talk* apresenta-se atenuado de 39dB.

³Sinal que é captado pelo receptor, aquando o envio do sinal, pode ser eléctrico e acústico

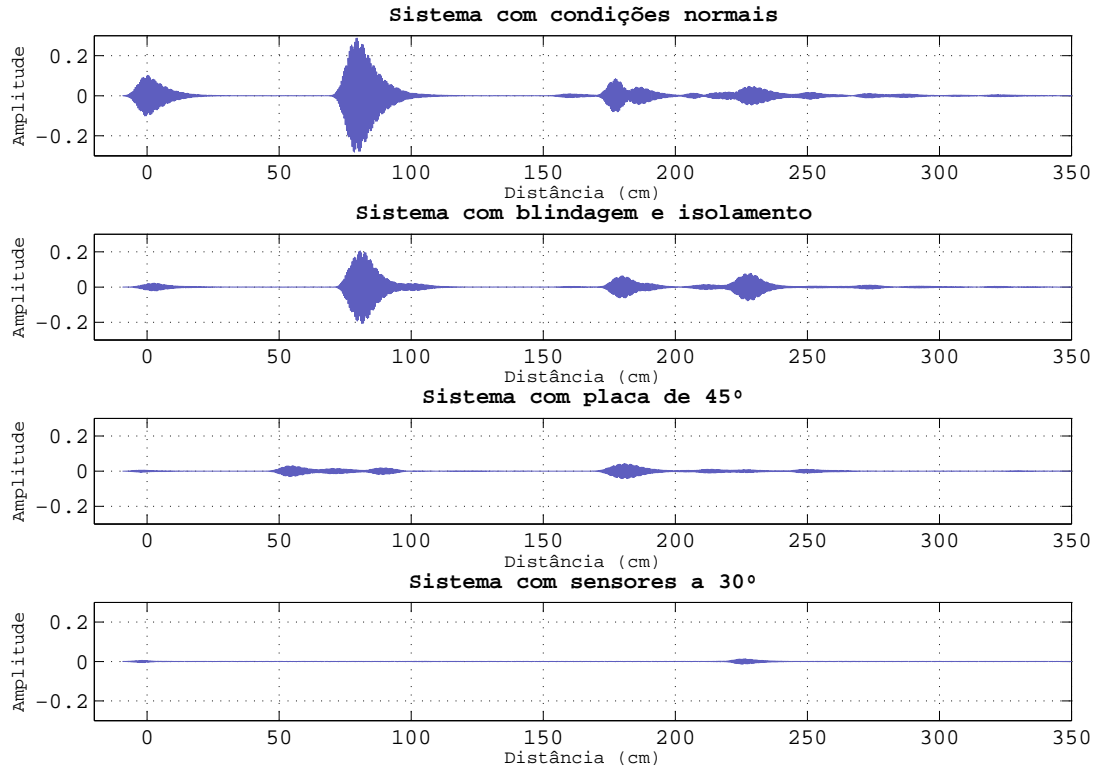


Figura 3.23: Comparação dos sinais obtidos na saída da *ADC*

Com a aplicação da placa de 45° , obtém-se uma atenuação bastante significativa do *cross-talk*⁴. Em relação à amplitude do sinal no teste 1, verificam-se 37dB de atenuação. Comparativamente, para o teste 2 (blindagem e isolamento), o valor é de 27dB . Sendo que, no teste 4, com a aplicação da placa de 45° e a colocação dos sensores a 30° , consegue-se um valor sensivelmente superior de 39dB .

Ecos do meio circundante

A partir do teste 1 mencionado anteriormente, fez-se um estudo dos ecos existentes no sinal. Foram tiradas conclusões importantes, tendo-se conseguido identificar a origem destes ecos, como se pode analisar na figura 3.24.

Perante a análise do gráfico apresentado na figura 3.24 e dos resultados do teste 4, pode-se afirmar que, ao eliminar o *cross-talk*, os ecos obtidos serão sempre ecos causados pela mão.

⁴Sinal que é captado pelo receptor, quando o envio do sinal, pode ser eléctrico e acústico

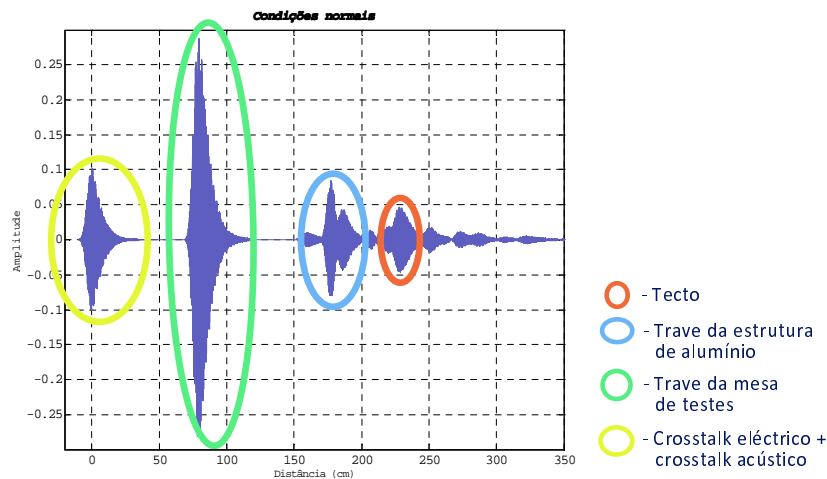


Figura 3.24: Identificação dos ecos causados pelo meio circundante

3.4.8 Ruído eléctrico

Em última análise, é necessário quantificar o ruído existente nos testes realizados com a placa de som, e nos testes anteriores (3.4.4), para daí se retirarem conclusões.

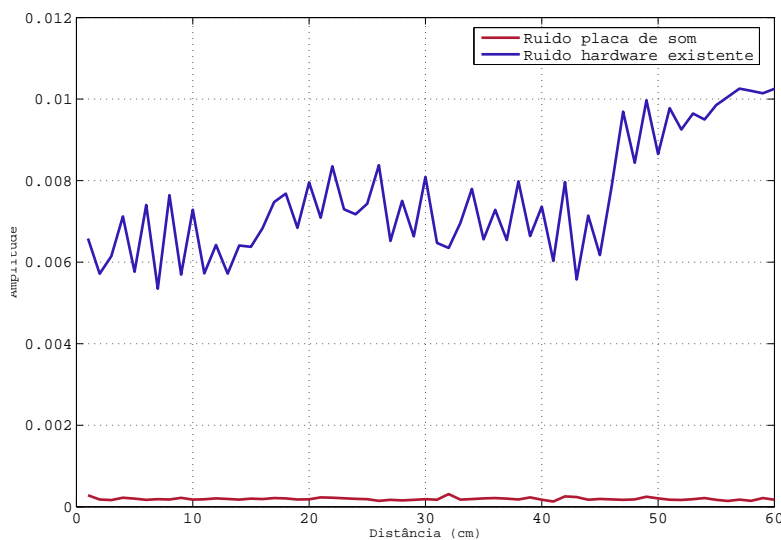


Figura 3.25: Comparação entre o ruído dos sistema com a placa de som e o sistema anterior

Como esperado, a diferença de ruído entre os dois sistemas é bastante significativa. Daqui se conclui que a origem do ruído está no hardware que recebe/envia o sinal para os sensores, pelo que se torna necessário desenvolver um novo sistema com menores níveis de ruído. Assim, garantir-se-à uma maior precisão das medidas realizadas.

3.4.9 Conclusões

Numa análise global, verifica-se a necessidade de projectar um sistema de aquisição/recepção com menor ruído e uma nova estrutura. Esta terá de ser desenvolvida tendo por objectivo a redução das interferências do cross-talk, tal como as do meio circundante. No capítulo seguinte será apresentado o projecto do *Theremin ultra-sónico* onde serão seguidas as directrizes retiradas deste capítulo.

Capítulo 4

Projecto de um Theremin Ultra-sónico

4.1 Introdução

Este Capítulo é dedicado especificamente à criação do Theremin ultra-sónico. Na primeira secção, “Descrição global do sistema”, serão apresentadas as principais escolhas realizadas, assim como as suas características (número de sensores, frequência de amostragem, etc). Na secção seguinte, “Algoritmo de medição da distância da mão” é apresentado o algoritmo desenvolvido, sob a forma de diagramas, para rápida interpretação. A abordagem ao hardware utilizado será realizada na secção “Sistema de aquisição e processamento”, em que são apresentados os blocos necessários para a implementação do sistema. Como secção final apresenta-se a secção, “Técnicas implementadas para redução da interferência do ruído”, onde são tratadas as técnicas usadas para reduzir o impacto do ruído no sistema. As secções descritas estão documentadas em maior pormenor nos anexos [A](#), [B](#) e na página do grupo de trabalho [Localização Ultra-sónica \(LOCUS\)](#)(ver [LOC07]) no projecto Theremin.

4.2 Descrição global do sistema

4.2.1 Número de sensores

O Theremin original é constituído por dois graus de controlo, conforme apresentado em [2.2](#) e na figura [4.29a](#). Devido à influência histórica deste, o sistema foi projectado com dois pares emissores/receptores de sensores ultra-sons, em que um par é responsável pela variação da frequência enquanto o outro realiza a variação do volume do som emitido. O Theremin projectado encontra-se ilustrado na figura [4.29b](#)

4.2.2 Sinal utilizado

Como mencionado em [3.3](#), optou-se pela utilização de um *chirp* como sinal enviado. O número de amostras escolhido teve como objectivo a diminuição da distância mínima para que não haja sobreposição entre o sinal enviado e o recebido. Este ponto assume grande

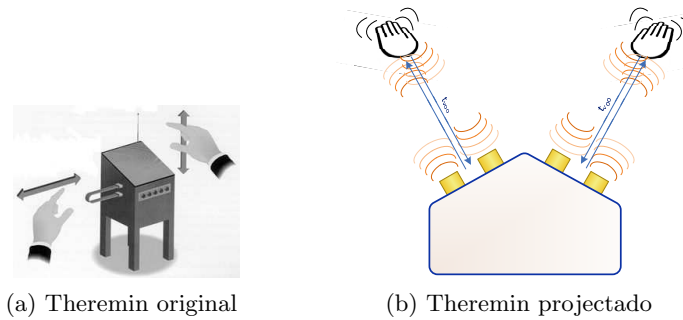


Figura 4.1: Comparação do Theremin original com o ThereMax

importância, na medida em que, quanto menor for o tempo que decorre aquando o envio do *chirp*, menor será a distância mínima à qual o sinal é enviado e recebido sem sobreposição. A figura 4.2 traduz o que foi descrito. Por outro lado, a gama de distâncias pretendida apresenta valores entre 10 e 50 centímetros, assim a energia necessária para propagar o sinal é baixa. Por todos os aspectos referidos, decidiu-se utilizar 128 amostras (N) para o sinal enviado.

4.2.3 Frequência de amostragem

Uma das dificuldades encontradas foi a escolha da frequência de amostragem, dado que é necessário ter em conta vários parâmetros, tais como: reactividade do sistema, distância mínima entre o receptor e o emissor (já referido em 4.2.2), limitação de velocidade de relógio da unidade de processamento (mencionada em 4.4.1).

Como primeira escolha usou-se o valor de 200KHz . Desta forma respeita-se o teorema de *Nyquist* [A.86], dado que a gama de frequências utilizadas vai dos 39 aos 41KHz (ver secção 4.4.3), e reduz-se o tempo necessário para emitir o sinal.

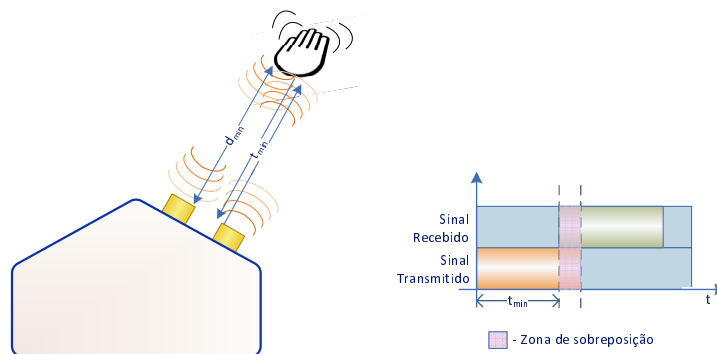


Figura 4.2: Diagrama ilustrativo da distância mínima

Verificou-se que o tempo despendido pelo algoritmo executado na rotina da [ADC](#) (de-

scrito em 4.3) era superior ao tempo de processamento disponível entre duas interrupções consecutivas. Assim, fixou-se a frequência de amostragem em 160 KHz, respeitando o teorema de *Nyquist* [A.86], sem que o tempo de voo seja muito afectado, como se pode verificar nas expressões 4.1 e 4.4, bem como a distância mínima entre os sensores e o obstáculo que corresponde a metade da distância percorrida (expressões 4.3 e 4.6).

Definindo a frequência, o período de amostragem e o número de amostras (mencionado em 4.2.2) tem-se:

$$\begin{aligned} F_s &= 200KHz \\ T_s &= \frac{1}{F_s}s \\ N &= 128 \end{aligned}$$

$$t = N \times T_s = 640\mu \quad \begin{array}{l} t - \text{Tempo de voo} \\ N - \text{Número de amostras} \end{array} \quad (4.1)$$

$$d = t \times v = 22cm \quad \begin{array}{l} v - \text{Velocidade do som} \\ d - \text{Distância percorrida} \end{array} \quad (4.2)$$

$$d_{min} = \frac{d}{2} = 11cm \quad d_{min} - \text{Distância mínima entre os sensores e o obstáculo} \quad (4.3)$$

Redefinindo a frequência para 160KHz tem-se:

$$\begin{aligned} F_s &= 160KHz \\ T_s &= \frac{1}{F_s} \end{aligned}$$

$$t = N \times T_s = 800\mu \quad \begin{array}{l} t - \text{Tempo de voo} \\ N - \text{Número de amostras} \end{array} \quad (4.4)$$

$$d = t \times v = 28cm \quad \begin{array}{l} v - \text{Velocidade do som} \\ d - \text{Distância percorrida} \end{array} \quad (4.5)$$

$$d_{min} = \frac{d}{2} = 14cm \quad d_{min} - \text{Distância mínima entre os sensores e o obstáculo} \quad (4.6)$$

4.2.4 Saída áudio e MIDI

Ficou definido que o Theremin terá um saída de áudio, isto é, o utilizador poderá ligá-lo a uns auscultadores ou a uma entrada de linha de um dispositivo. O som produzido consiste numa sinusóide que varia na frequência conforme a distância, de modo a manter as características do Theremin original.

Por outro lado, implementou-se uma interface MIDI. Com esta interface é possível conectar o Theremin de muitas formas a qualquer dispositivo com uma entrada MIDI. Nesta interface foram criados dois canais: um para a variação das notas e outro para a variação do volume. Existem dois modos de funcionamento pré-definidos:

- modo 1 - envio de três escalas musicais, semelhante a um teclado e variação do volume;
- modo 2 - envio de todas as notas possíveis no midi (de 0 a 127) nos dois canais;

O primeiro modo destina-se a situações onde o utilizador apenas pretende ligar o Theremin a um dispositivo de forma a obter notas musicais, semelhante a um instrumento. O segundo modo destina-se à utilização do software MAX (mencionado em 2.3.3), que permite ao utilizador utilizar os valores de 0 a 127, dos dois canais e, consoante a programação realizada, obter novos sons.

4.3 Algoritmo de medição da distância da mão

Para a obtenção de medidas precisas da posição da mão, foi necessário desenvolver vários algoritmos de modo a melhorar estas medições. O diagrama da figura 4.3 apresenta o funcionamento geral do programa principal. Após a conclusão das primeiras fases, arranque e inicialização, o sistema entra em ciclo infinito. No decorrer do tempo, ocorrem interrupções consoante a frequência de amostragem configurada (ver subsec:freq).



Figura 4.3: Diagrama ilustrativo do funcionamento geral do sistema

Diagrama temporal

As interrupções controlam a sequência de tarefas implementadas:

- Aquisição/Recepção;
- Detecção de Pico;
- Filtragem das medidas;
- MIDI;
- Áudio.

Na figura 4.4 estão descritas as tarefas referidas.

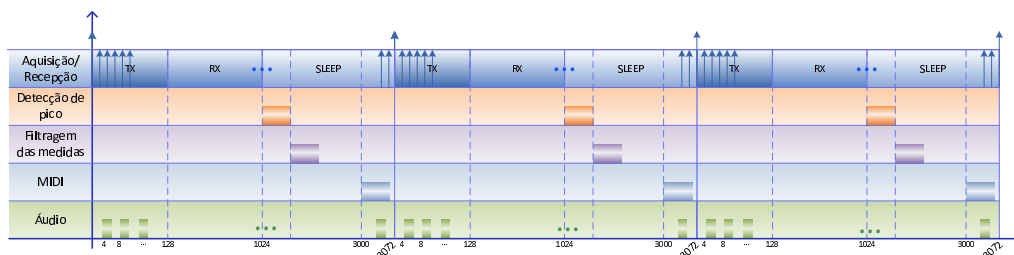


Figura 4.4: Diagrama temporal representativo das tarefas implementadas

4.3.1 Tarefas implementadas

As tarefas apresentadas na figura 4.4 constituem os blocos necessários para a obtenção da posição da mão, processamento do áudio e do MIDI. Cada bloco é constituído por vários algoritmos. De seguida, apresentam-se os algoritmos que constituem cada tarefa implementada

Aquisição/Recepção

Esta tarefa corresponde ao algoritmo presente na rotina de interrupção da [ADC](#) (ver anexo [B.1](#) para consulta do código desenvolvido). Neste bloco de processamento é realizado o envio/recepção de uma amostra sempre que ocorre uma interrupção e coloca a amostra recebida num *buffer* - *buff_C1*, para ser utilizado pela tarefa seguinte (Detecção de pico). O algoritmo está descrito nos diagramas da figura 4.5. No diagrama da esquerda encontra-se o algoritmo responsável pela aquisição/recepção de sinal. No lado oposto, está descrita a continuação com o algoritmo implementado para a detecção de overflow na [ADC](#).

Detecção de pico

Para a detecção de pico é utilizada uma “janela” de 1024 amostras, que possibilita a detecção da posição da mão até cerca de 75 centímetros. Quando são finalizadas 1024 aquisições, é lançada a tarefa 1, ou seja, é iniciado o processamento relativo à detecção de pico. Após esta tarefa ser iniciada, decorrem 650 interrupções da [ADC](#) até à sua finalização, sendo a tarefa mais demorada. Este procedimento está descrito no lado esquerdo da figura 4.6. A tarefa de detecção de pico é constituída pelos blocos:

- Filtro óptimo (correlador);
- Sinal ao quadrado;
- Filtro passa-baixo (detector de envolvente) - filtro de [FIR](#) de ordem 24, com $f_c = 400Hz$;
- Cálculo do máximo.

Estes blocos estão apresentados no lado direito da figura já mencionada. Para consulta do código desenvolvido, ver [B.2](#).

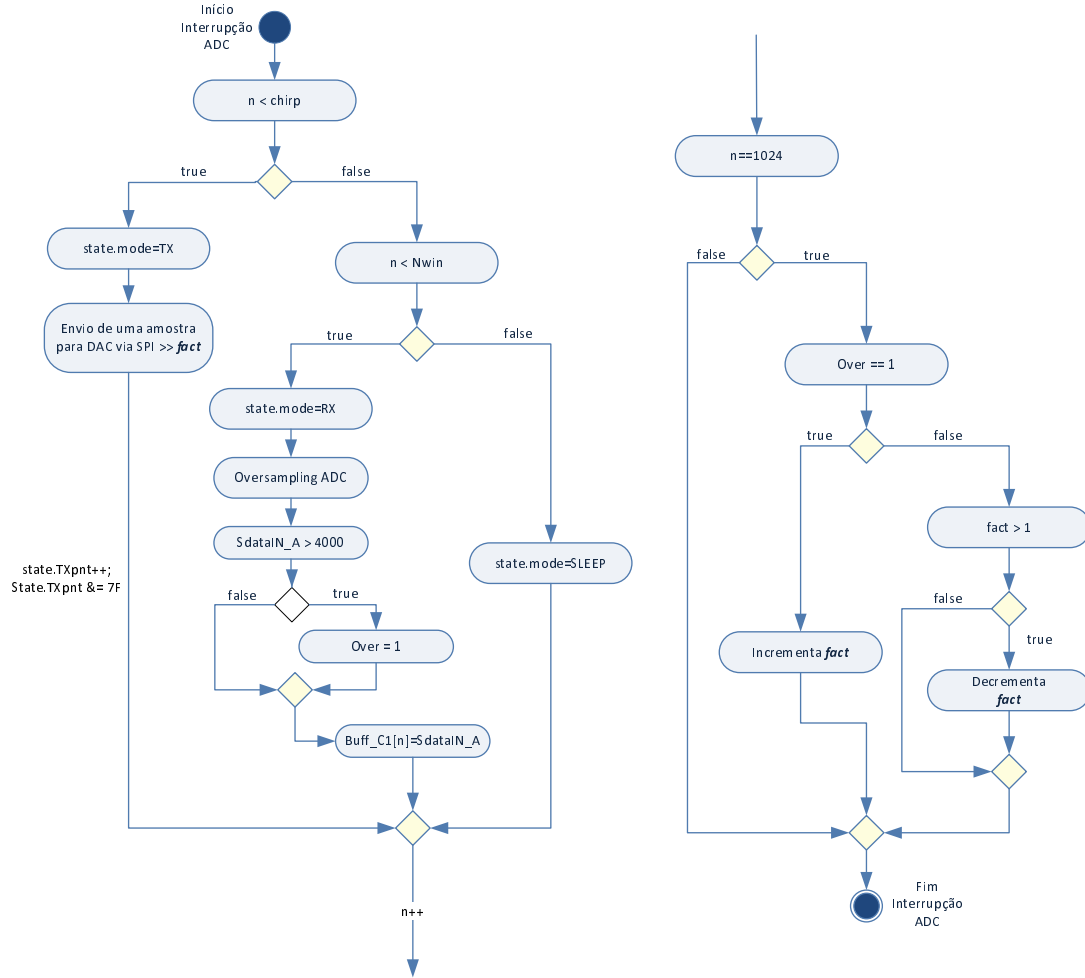


Figura 4.5: Diagrama ilustrativo da tarefa Aquisição/Recepção

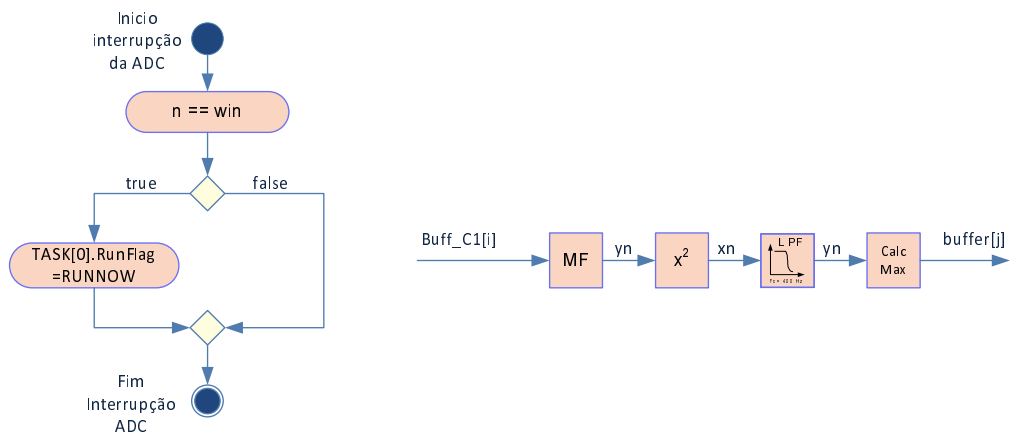


Figura 4.6: Diagrama ilustrativo da tarefa Detecção de pico

Para evitar medições erradas da posição da mão, foram criados dois estados para o sistema, o estado *Lock* e o estado *Unlock*. Estes estados apresentam um funcionamento simples e eficaz. Analisando a amplitude do pico detectado e a distância a que este corresponde, o sistema qualifica a medida de correcta ou errada. Caso o sistema qualifique cinco medidas consecutivas como correctas, entra em estado *Lock*. Caso qualifique duas medidas como erradas passará ao estado de *Unlock*. Este limiar, foi condicionado pela necessidade de o sistema ser bastante reactivo.

Filtragem das medidas

Após ser detectado o pico, é necessário realizar processamento de sinal às medidas obtidas ao longo do tempo. O processamento aqui realizado, tem a duração de 3 interrupções da ADC. De forma a eliminar variações indesejadas causadas por vários factores, implementou-se um filtro mediana e um filtro média, conforme apresentado na figura 4.7. O filtro mediana permite eliminar erros impulsivos, isto é, muito afastadas da média - o filtro utilizado realiza a mediana com uma janela de amostragem de cinco amostras, por forma a manter a reactividade do sistema. Em complemento o filtro média, elimina as pequenas variações. Este último foi implementado através de um filtro IIR de primeira ordem com os seguintes características (O código desenvolvido para esta tarefa está apresentado no anexo B.3):

- tipo - *butter*, passa-baixo;
- ordem - 1;
- Frequência de corte - $32KHz$.

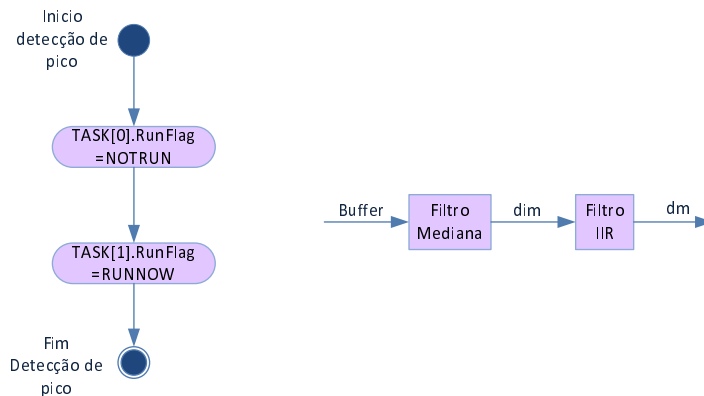


Figura 4.7: Diagrama ilustrativo da tarefa Filtragem das medidas

Os resultados referentes à implementação destes filtros encontram-se apresentados em 5.3.1.

Áudio

A partir da posição da mão, é necessário gerar uma sinusóide com uma frequência proporcional. São utilizados os osciladores disponibilizados pela *Texas Instruments* para o **DSP**¹, para gerar a sinusóide desejada (ver informação detalhada no site referenciado em [LOC07]) Foi utilizada o valor de $40KHz$ como frequência de amostragem, uma vez que o ouvido humano só consegue ouvir frequências até cerca de $20KHz$. Para este efeito na rotina de serviço à interrupção da ADC, colocou-se a variável contadora *sound*, que só permite o envio da informação áudio para a **Digital-to-Analog Converter (DAC)** a um ritmo de $F_s/4$. Verifica-se no diagrama da figura 4.8 o que foi explicado.

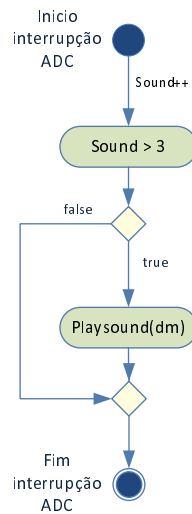


Figura 4.8: Diagrama ilustrativo da tarefa responsável pelo áudio

MIDI

Foram utilizados dois tipos de tradução da posição da mão. Num caso, converteu-se a posição da mão em valores entre 0 e 127 (amplitude máxima da escala), como apresentado na figura 4.9. Para o outro caso, a posição corresponde às 7 notas da escala natural, sob a forma de degraus, como ilustrado na figura 4.16. Esta tarefa tem a duração de 255 interrupções da ADC. Consultar o anexo B.5 onde se encontra descrito o algoritmo utilizado.

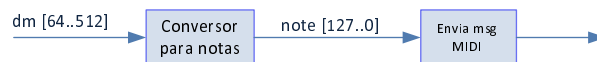


Figura 4.9: Diagrama ilustrativo da tarefa responsável pelo MIDI

¹Disponibilizado no ficheiro “sprc083.zip”, consultar o *link* <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/sprc083.html> para o *download* deste

4.4 Sistema de aquisição e processamento

O sistema de aquisição e processamento é constituído por vários blocos (como se pode verificar na figura 4.10). Estes blocos estão organizados em três módulos: unidade de processamento, placa de aquisição e o sistema de envio/recepção de ultra-sons.

A partir do processamento do sinal, este é enviado via [Serial Peripheral Interface \(SPI\)](#), é um protocolo série síncrono usado para a troca de informação entre dois dispositivos, um chamado de *master* e outro chamado de *slave*. Esta a informação é transmitida bit a bit e é realizada no modo full duplex, isto é, a troca de dados é realizada nos dois sentidos, para a conversão digital/analógica, sendo posteriormente amplificado e condicionado. Por fim, é emitido pelos sensores ultra-sons.

Nos receptores de ultra-sons é recebido o sinal emitido, que terá sido reflectido por um obstáculo. O sinal é enviado para o bloco de condicionamento de sinal, onde se efectua a filtragem e a amplificação deste. De seguida, já no bloco processamento do sinal é interpretada a informação recebida, ou seja, os ecos de obstáculos. Os ecos correspondem à distância a que o obstáculo está dos sensores. Com base nesta distância é enviada via [Serial Communication Interface \(SCI\)](#), é um interface constituído por uma porta série assíncrona possuindo dois canais (TX e RX), informação MIDI. Por outro lado, na saída de áudio, é enviado um sinal com uma frequência proporcional à distância.

4.4.1 Unidade de processamento

Este módulo é constituído pelo *kit eZdsp F2812 for TMS320F2812*² onde se encontra o [DSP 2812](#). Escolheu-se este kit para desenvolver o ThereMax uma vez que era a melhor opção dentro dos dispositivos disponíveis para projectos. O [DSP](#) é um processador com uma arquitectura dedicada para processamento de sinal, assim este processador é o indicado para o desenvolvimento deste projecto. Juntamente com este kit é disponibilizado um programa para desenvolvimento de *firmware* para o [DSP](#), o *Code Composer Studio*. Este programa em conjunto com a porta paralela, existente no *kit*, cria um ambiente de desenvolvimento muito sofisticado.

4.4.2 Placa de aquisição - *Locus Board V3*

Para o tratamento da informação trocada com a unidade de processamento, é necessária a existência de uma placa de aquisição. Nesta placa são realizadas várias funções, sendo apenas algumas utilizadas para o desenvolvimento do projecto. Na figura 4.12 encontram-se os blocos utilizados. O bloco de cor roxa representa a [DAC](#). A verde está representado o bloco onde são interligadas a placa de aquisição e a placa pertencente ao sistema de envio e recepção de ultra-sons (mencionada no ponto seguinte).

O desenvolvimento da placa *Locus Board V3* foi realizado num projecto anterior [Lop06], sendo alvo de desenvolvimento no projecto actual. No anexo A.1 encontra-se o esquema eléctrico desta placa.

²Consultar a página mencionada em [LOC07] para informação detalhada

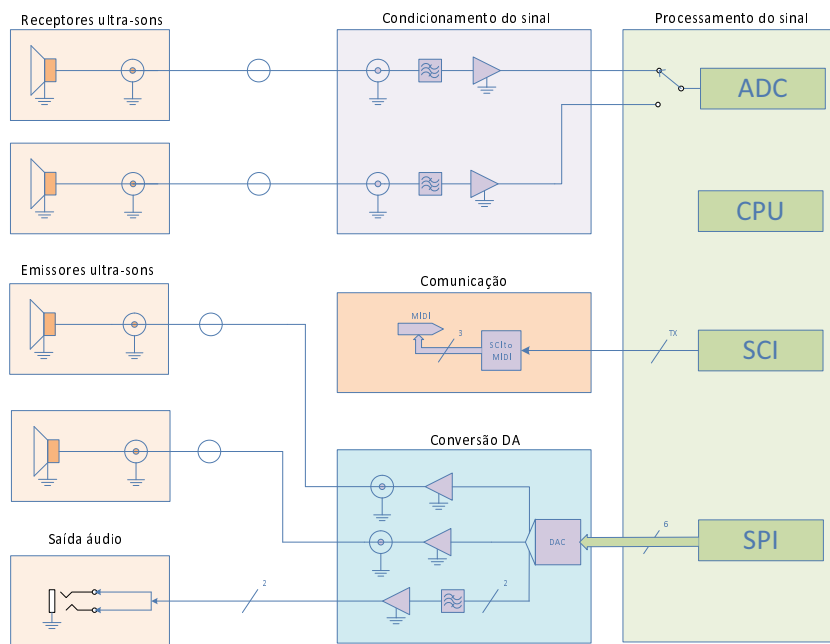


Figura 4.10: Diagrama do representativo do sistema de aquisição e processamento

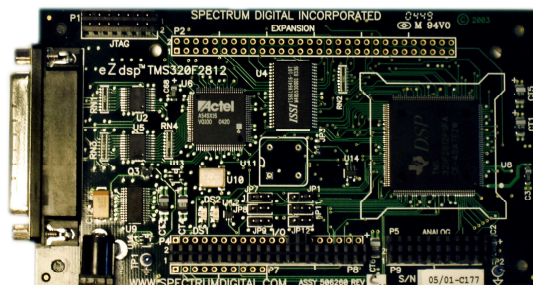


Figura 4.11: Kit eZdsp F2812

4.4.3 Sistema de envio/recepção de ultra-sons

Devido à necessidade de alterar alguns blocos na placa descrita no ponto anterior, projectou-se uma placa auxiliar para possibilitar a ligação entre a placa de aquisição e os sensores de ultra-sons. Esta encontra-se assinalada com um bloco verde na figura 4.12. O cabo que é utilizado para interligar as duas placas encontra-se identificado pelo bloco cor de laranja na figura 4.13.

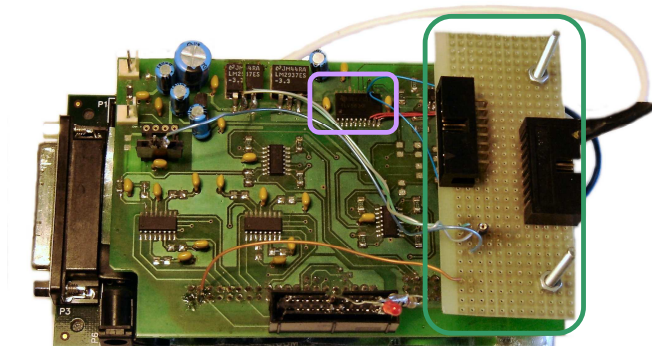


Figura 4.12: Placa de aquisição e blocos constituintes

Implementaram-se os seguintes blocos (ver a figura referida anteriormente):

- Bloco Amarelo - Condicionamento e amplificação do sinal recebido;
- Bloco Verde - Condicionamento e amplificação do sinal emitido;
- Bloco roxo - Interface MIDI (ver [4.4.5](#)).

Para consulta de esquemas eléctricos e especificações consultar o anexo [A.2](#)

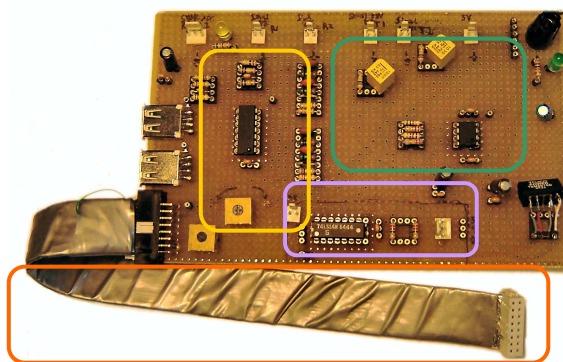


Figura 4.13: Sistema de envio/recepção de ultra-sons e blocos constituintes

Sensores

Os sensores escolhidos foram: o *400SR-160* como receptor e o *400ST-160* como emissor (para informação mais detalhada aceda ao link referenciado em [\[LOC07\]](#)). A escolha destes sensores teve por base os bons resultados obtidos nos testes referidos na secção [3.4](#). A alternativa possível seria utilizar o par emissor/receptor *500MB120*, mas os resultados deste não satisfaziam os requisitos (como se pode verificar nos testes apresentados na secção já referida).

Estrutura de suporte

A estrutura construída contém uma forte componente histórica, estando de acordo com os dois graus de controlo existentes no Theremin original (já mencionado em 4.2.1). Para além do referido, as características dos sensores utilizados mencionadas anteriormente, também condicionaram o desenho da estrutura, uma vez que o diagrama de sensibilidade apresenta uma abertura de 60° . Os sensores foram colocados de forma a que a normal ao plano que contém o par emissor/receptor faça 60° com o plano do tecto. Esta implementação permite minimizar as reflexões provenientes do tecto.

Perante alguns testes efectuados (ver 3.4), verificou-se a existência de algumas reflexões no interior da estrutura e cross-talk acústico. Por este motivo colocou-se uma placa de madeira em que esta faz um ângulo de 45° com a direcção dos sensores, levando a que as reflexões não atinjam os sensores. Estas características podem ser analisadas na figura 4.14. Nestas duas últimas é apresentada a estrutura com a qual se desenvolveu o ThereMax.

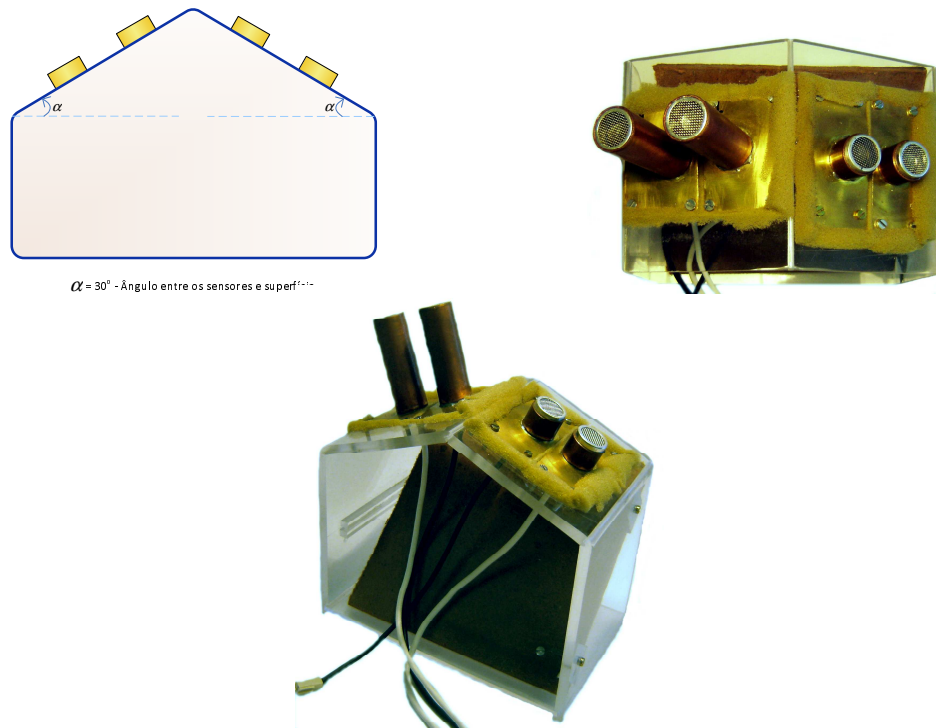


Figura 4.14: Diagrama da Estrutura de suporte

4.4.4 Line Out

A saída áudio está implementada com um sistema básico que é composto pelo sinal enviado pela DAC e por um filtro passa-baixo. Este filtro tem a função de eliminar as componentes de frequência indesejadas, possibilitando uma melhor qualidade do som emitido.

4.4.5 Interface MIDI

Como referido em 4.2.4, a interface MIDI proporciona várias utilizações possíveis ao There-Max, não só ao nível de interligação com outros instrumentos, mas também ao nível de programação a partir das mensagens MIDI, como por exemplo a interação com o MAX (mencionado em 2.3.3).

Descrição

Como descrito em 4.2.4, o MIDI é um protocolo série assíncrono. Para implementar a interface série, foi apenas necessário configurar a porta série do kit (ver 4.4.1) com os parâmetros necessários e realizar as ligações conforme o diagrama da figura 4.15

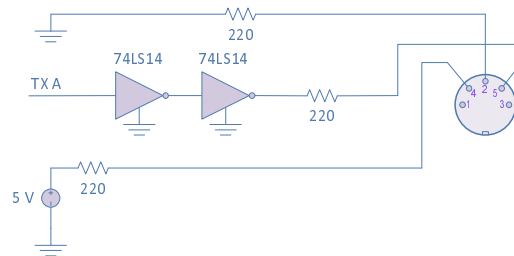


Figura 4.15: Diagrama da implementação da interface *MIDI*

Mensagens *MIDI* utilizadas

Das mensagens possíveis descritas em 4.2.4, para a implementação do algoritmo descrito em 4.3.1, só as mensagens do tipo *Voice* foram utilizadas. Dentro deste tipo foram utilizadas as seguintes mensagens *MIDI*:

- *Note ON*;
- *Note OFF*;

Control Change

- *Portamento Time*;
- *Portamento ON/OFF*;
- *Attack Time*;
- *Release Time*;
- *All sounds OFF*;
- *Mono receive mode*.

Interacção com o MAX

A partir do *MIDI*, da criatividade e do *MAX*, é possível desenvolver muitas aplicações com resultados interessantes. De forma a possibilitar uma fácil interacção entre as mensagens *MIDI* enviadas e o *MAX*, são enviadas mensagens “*Note On*”, com valores proporcionais à distância da mão. Os valores possíveis para as mensagens referidas estão entre 0 e 127. Assim, conforme a distância da mão ao ThereMax, são enviadas mensagens “*Note On*” dentro dos valores referidos, como é demonstrado nos dois diagramas na parte superior da figura 4.16 - modo 1 de funcionamento. Na mesma figura é apresentado o diagrama explicativo do modo 2, mencionado em 4.2.4.

Em relação ao 2º grau de controlo (ver secção 4.2), este tem um funcionamento igual ao grau referente à variação da nota, quando se utiliza o *MAX* (modo 1). Para o outro modo, é realizada a variação do volume geral utilizando as mensagens descritas no ponto anterior, para este efeito.

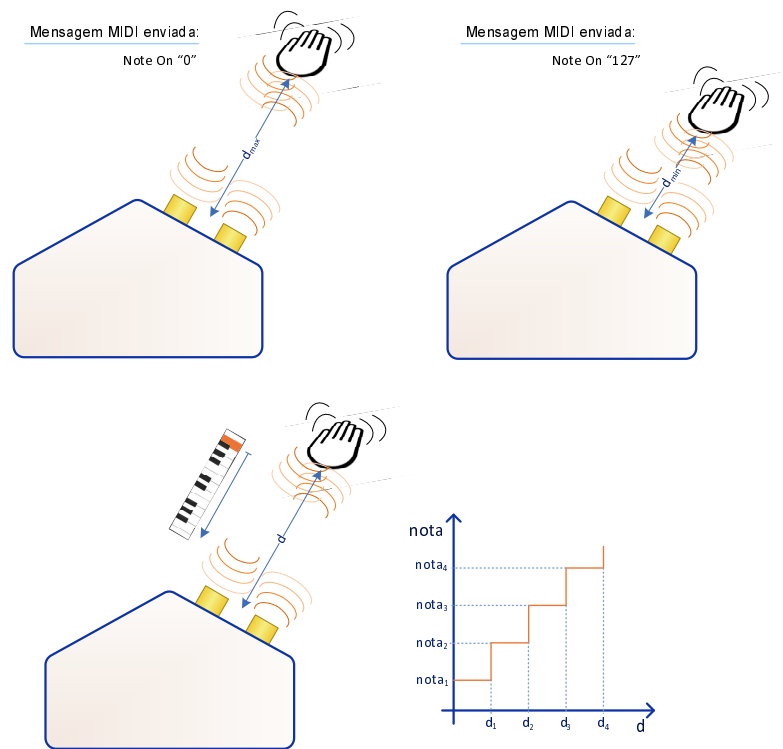


Figura 4.16: Diagrama representativo das mensagens *midi* enviadas

4.4.6 Evolução do *Hardware* e do *Software*

O estudo descrito em 3.4.6 demonstrou que a utilização do método da diversidade espacial aumenta a fiabilidade do sistema. Ou seja, ao se aumentar o número de sensores receptores aumenta-se a robustez do sistema de detecção da posição da mão.

Com esta motivação, decidiu-se desenvolver um novo *hardware* baseado num sistema de

aquisição multi-sensor. Nesta fase, decidiu-se avançar com o uso da nova versão da placa de aquisição - *Locus Board 2007* (encontra-se no anexo A.3 a descrição desta placa). Esta versão foi desenvolvida tendo em vista a redução do ruído eléctrico e a criação de novos módulos:

- saída pré-amplificada para auscultadores ou um aparelho hi-fi;
- entrada áudio (*line in*) para a ligação de aparelhos já referidos;
- entrada para microfone tipo electrôto.

O desenvolvimento desta versão decorreu no âmbito do projecto de 5º ano [Cou07].

Suporte dos sensores

Decidiu-se utilizar um suporte com um emissor e três receptores para o controlo da frequência, uma vez que o ouvido humano é muito sensível a variações bruscas de frequência. Por outro lado, para o volume decidiu-se utilizar um simples par emissor-receptor, pois para o controlo do volume não existe a necessidade de uma precisão muito elevada. Como se pode verificar no diagrama da figura 4.17, nestes novos suportes não existe uma caixa de suporte.

Com base nos resultados obtidos com os suportes utilizados no projecto “Sistema de Localização com Ultra-Sons” [Alb07], a caixa foi trocada por tubos metálicos. Os sensores são inseridos no interior do tubo e ficam à face do tubo.

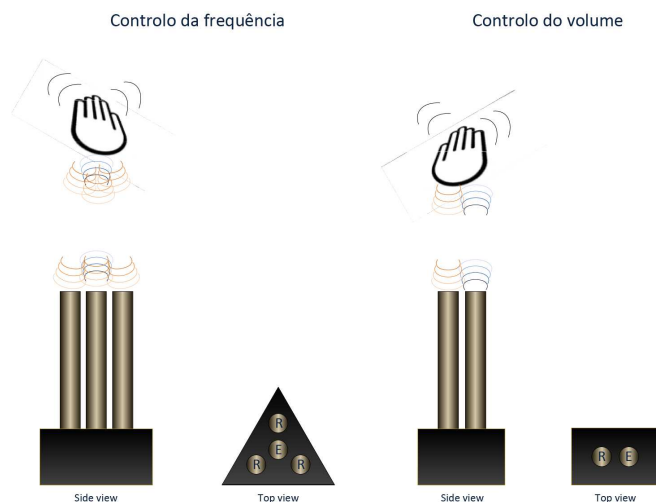
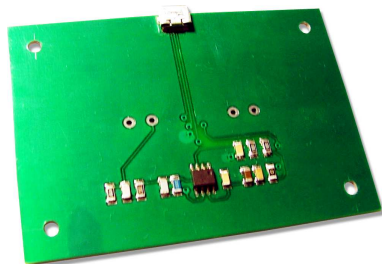
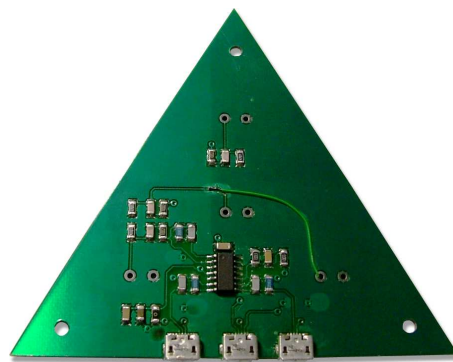


Figura 4.17: Diagrama do sistema de aquisição multi-sensor

Foi necessário desenvolver as **Printed Circuit Boards (PCBs)** que realizam a pré-amplificação do sinal recebido (o esquema eléctrico encontra-se em A.4). Nas figuras 4.18a e 4.18b estão apresentadas as **PCBs** referidas (o esquema eléctrico encontra-se no anexo A.4).



(a) Placa com um par de sensores ultra-sons (emissor e receptor)



(b) Placa com um sensor emissor e três receptores ultra-sons

Figura 4.18: Placas desenvolvidas para os sensores ultra-sons

Caixa em acrílico e LED RGB

Juntamente com o desenvolvimento do sistema multi-sensor, pensou-se em criar algo mais do que um Theremin ultra-sónico. A ideia que surgiu foi a de acrescentar uma componente visual, ou seja, ampliar as capacidades do ThereMax como hiper-instrumento. Decidiu-se recriar o conceito do órgão de cores construído por Castel (secção 2.3), associando a cada nota musical uma cor. O mapeamento entre posição da mão, som e cor foi implementado de acordo com a figura 4.19. Como se verifica, a gama de frequências das notas musicais utilizadas (de 110Hz a 830Hz, correspondendo ao intervalo de A2 a G5) é mapeada numa gama aproximada de frequências entre 480THz e 680THz (espectro de cor entre vermelho e azul, respectivamente). Assim, à medida que a frequência da nota musical aumenta, a cor emitida pelos [Light Emitting Diode \(LED\) Red Green Blue \(RGB\)](#) aproxima-se do azul. Outros mapeamentos seriam possíveis, naturalmente.

Para a concretização da ideia referida anteriormente projectou-se uma caixa em acrílico que tem duas funções: caixa para o *hardware* e guia de luz para os [LED](#). Na figura 4.20 encontra-se a caixa construída e a descrição dos módulos que constituem o *hardware*:

- Fonte de alimentação (consultar as especificações em [LOC07]);
- Kit eZdsp F2812 (ver 4.4.1);
- *Locus Board 2007* (ver anexo A.3);
- Interface LED (ver anexo A.5);
- LED RGB. ³

³componentes disponibilizados pela HFA - Henrique, Fernando e Alves, Lda.

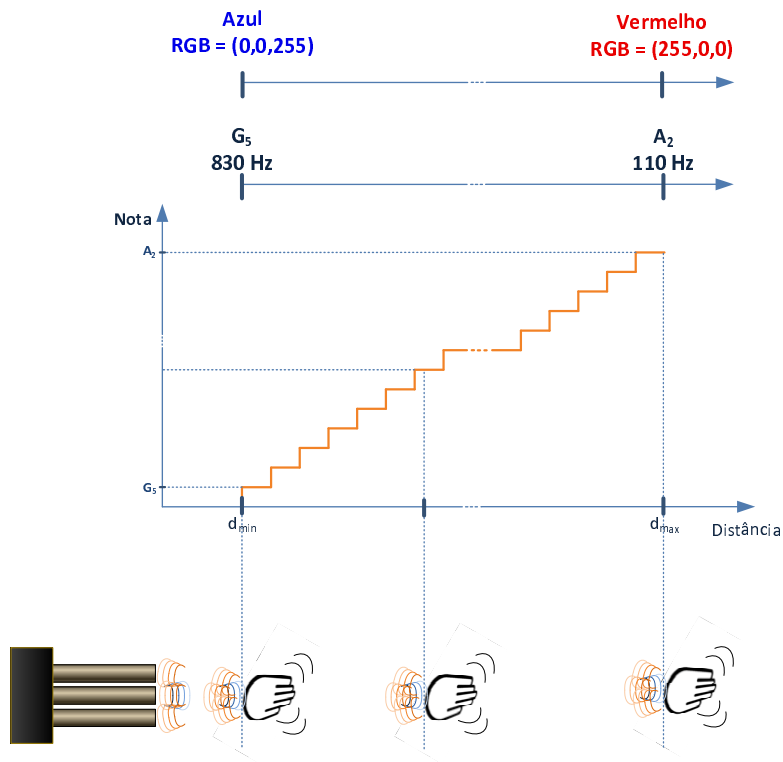


Figura 4.19: Mapeamento entre som e cor

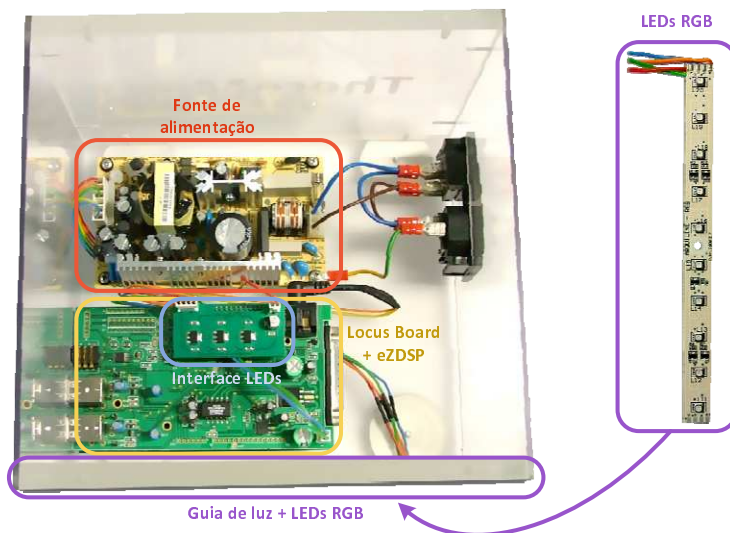


Figura 4.20: Caixa em acrílico e a descrição dos blocos constituintes

Nas figuras 4.21a e 4.21b apresenta-se a caixa em acrílico iluminada com os LED RGB e sem nenhuma cor emitida. O bloco “Interface LED” tem a função de adaptar o sinal de controlo relativamente ao nível de tensão dos LED (fig. 4.22).

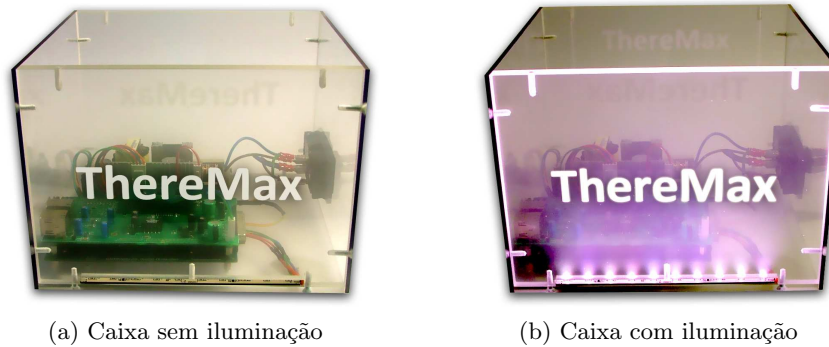


Figura 4.21: Caixa em acrílico - vista de lado

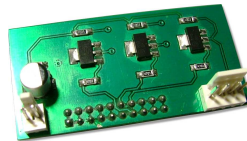


Figura 4.22: Placa de interface com os LED RGB

Evolução do software

Tendo em vista a redução da complexidade do hardware, pensou-se em utilizar uma sinusóide como sinal enviado. Desta forma o filtro óptimo (ver 4.3.1) é retirado, ficando apenas o bloco onde o sinal é elevado ao quadrado e o bloco do filtro passa-baixo, como demonstrado na figura 4.23.

Retirando o bloco que exige mais poder de processamento - filtro óptimo, é possível migrar do DSP para um microcontrolador de baixo custo. Apesar da análise realizada em 3.3 ser favorável à utilização do *Chirp*, com a recurso a vários sensores receptores é possível obter resultados satisfatórios.

De modo a implementar a mapeamento referido anteriormente desenvolveu-se a função *histerese* que divide as possíveis posições da mão em intervalos discretos como demonstrado na figura 4.19(o código C desenvolvido encontra-se no anexo B.6).

Após o cálculo da nota correspondente à posição da mão, segundo o mapeamento implementado, obtém-se a cor a emitir. O controlo da cor que os LED RGB emitem é realizado através de **Pulse Width Modulation (PWM)**. Considerando a nota Ré# 5 (622.25 Hz) a cor correspondente tem as seguintes componentes:

- Red (R) - 0;

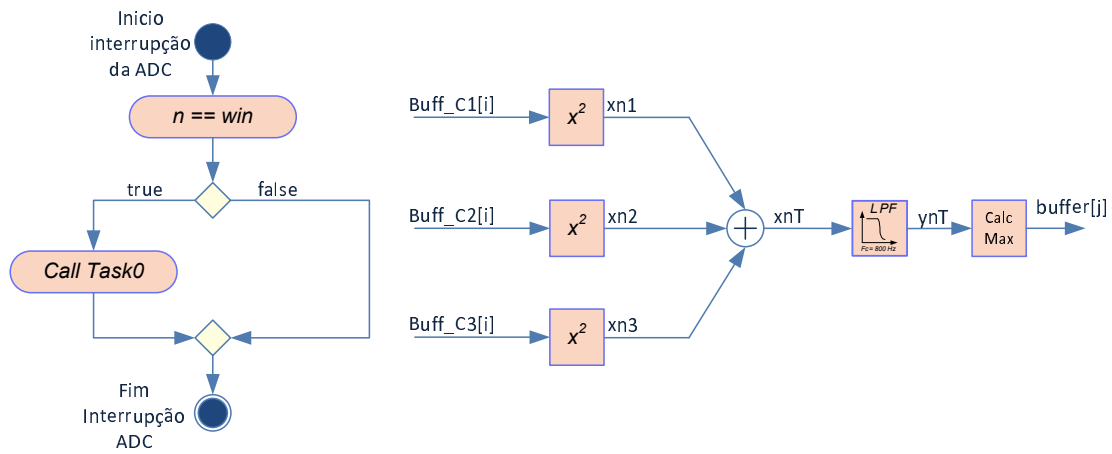


Figura 4.23: Diagrama ilustrativo da tarefa Detecção de pico

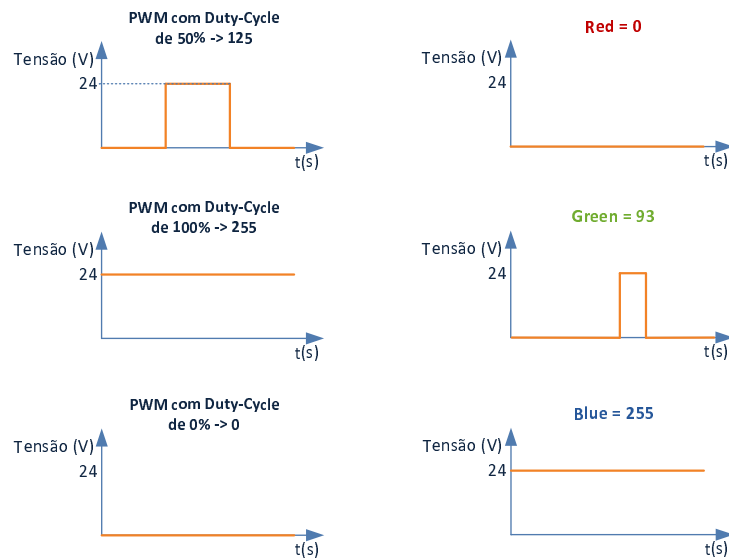


Figura 4.24: Controle da cor dos LED RGB

- Green (G) - 93;
- Blue (B) - 255.

A variação do *duty-cycle* do sinal **PWM** define a cor dos **LED RGB**, como descrito na figura 4.24 encontra-se associação entre a cor e o *duty-cycle*.

Com o intuito de alterar a geração do sinal áudio (referido em 4.3.1), desenvolveu-se uma função que realiza a modulação **Frequency Modulation (FM)** em áudio, conforme descrição na equação 4.7. A posição da mão detectada define a frequência da portadora (neste caso $f_m = f_p$). Esta função implementa a modulação desenvolvida por John M. Chowning [Ben08]

$$x(t) = \cos(2\pi f_p t + 2\pi \beta \cos(2\pi f_m t)), \quad t \in [0, T] \quad (4.7)$$

f_p - frequência portadora
 β - Índice de modulação
 f_m - frequência modulante
 T - Duração da nota musical

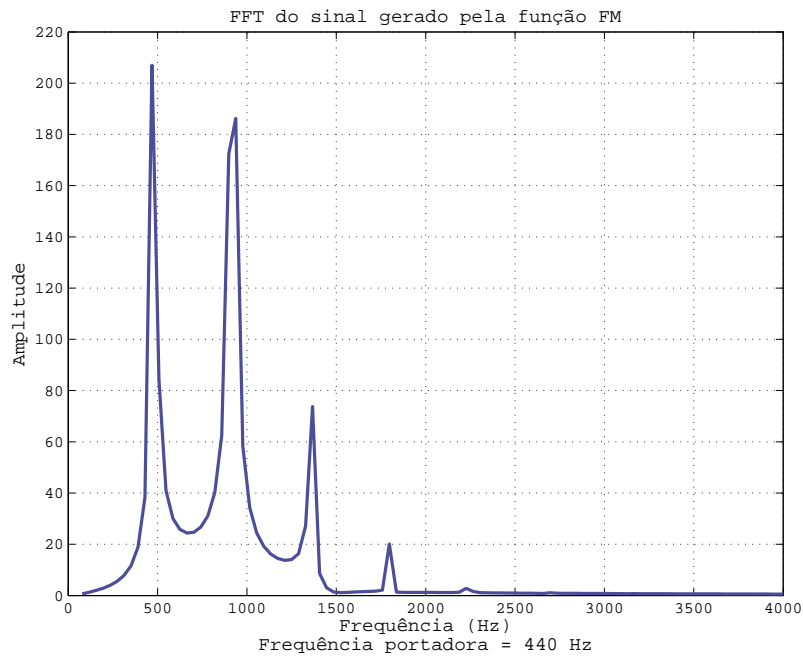


Figura 4.25: Modulação FM

Uma vez que a sinal produzido com esta modulação contém várias componentes de frequência (como ilustrado na figura 4.25), este é mais natural do que o som de uma sinusóide, onde só existe uma componente de frequência. No anexo B.7 encontra-se o código C desenvolvido.

Saída áudio (*Line Out*)

Com a utilização da nova placa de aquisição (referida anteriormente), implementou-se a saída áudio através de um circuito integrado dedicado. Este circuito realiza pré-amplificação, filtragem e adaptação de impedância do sinal áudio (consulte o esquema eléctrico apresentado em A.3).

4.5 Técnicas para redução da interferência do ruído

Como descrito nas secções 3.4.8 e 3.4.7, verificou-se que o ruído interferia significativamente no desempenho do sistema. Desta forma, desenvolveram-se e implementaram-se algumas técnicas para a redução da interferência do ruído.

4.5.1 Diminuição da interferência da unidade de processamento na placa de aquisição

De modo a reduzir as interferências entre a *locus board* e o *kit eZdsp* e de criar alguma imunidade ao ruído exterior, pensou-se em colocar um plano de massa entre eles. Para o efeito, utilizou-se papel de alumínio posteriormente plastificado, onde este foi ligado à massa. A aplicação desta técnica está conforme a figura 4.26

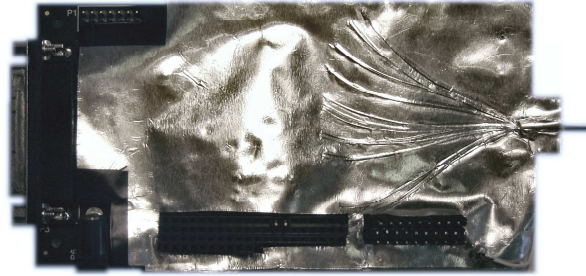


Figura 4.26: Fotografia do *kit eZdsp* juntamente com o plano de massa implementado

4.5.2 Blindagem dos sensores Emissores e Receptores

Vários factores motivaram a blindagem dos sensores. Por um lado verificou-se que os sensores utilizados captavam sinal proveniente da parte traseira deste (resultados apresentados em 3.4.7), por outro lado alguns testes revelaram que a ligação entre o sensor e o cabo coaxial desprotegida originava muito ruído.

Pelos factores apresentados decidiu-se criar uma “gaiola de faraday” [GF96] para os sensores de forma a isolar estes de qualquer interferência. Na figura 4.27 encontra-se a estrutura construída para o efeito descrito.

4.5.3 Oversampling

Sabendo que a ADC do *kit* permite obter várias conversões de um canal numa só interrupção, efectuaram-se 8 conversões sucessivas do canal em análise. De seguida, os valores das conversões foram somados e divididos pelo número destas. O procedimento descrito está ilustrado no diagrama presente na figura 4.28. Teoricamente, com esta técnica seria possível reduzir o ruído de um factor de $\frac{1}{\sqrt{N}}$, onde N é o número de repetições da amostragem.

Como demonstrado nos gráficos apresentados em 4.29a e 4.29b, os resultados obtidos são inconclusivos. Apenas se verificou uma pequena redução do valor do desvio padrão:

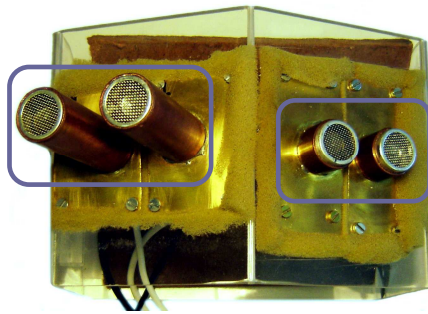


Figura 4.27: Blindagem dos sensores de ultra-sons

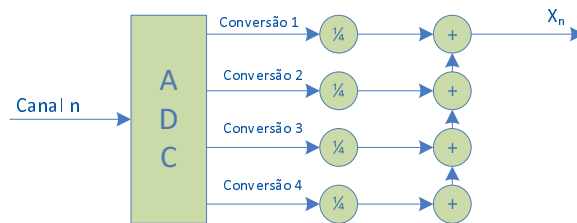
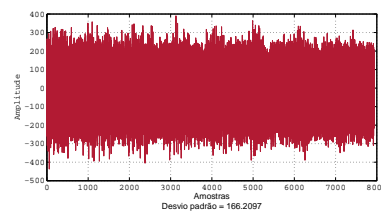


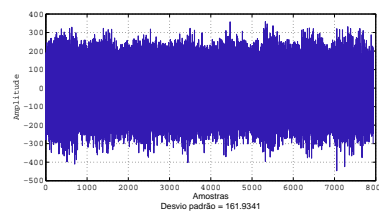
Figura 4.28: Diagrama ilustrativo do *oversampling*

- 166.21 medição realizada sem *oversampling*;
- 161.93 medição realizada com *oversampling*.

Esta diferença não é significativa, sendo que era esperado um factor de redução de $1/\sqrt{8}$.



(a) Medição sem *oversampling*



(b) Medição com *oversampling*

Figura 4.29: Ruído eléctrico sem e com *oversampling*

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introdução

No decorrer deste projecto, foram realizados vários testes destinados a qualificar e quantificar erros e problemas. Com os resultados destes testes, juntamente com os obtidos nos testes apresentados em 3.4.5, foi possível avaliar em pormenor o desempenho do sistema. Seguidamente projectaram-se várias alterações e técnicas para se obter o desempenho pretendido¹ do *Theremin ultra-sónico*, ao nível da detecção da posição da mão.

Para realizar uma descrição final do desempenho do sistema implementado, descrito em 4, foram realizados ensaios finais que serão apresentados na secção “Ensaio de verificação do funcionamento do *Theremin*”. Os resultados obtidos nos testes mencionados, serão descritos na secção “Resultados finais”, tal como o desempenho dos módulos Áudio e MIDI.

5.2 Ensaio de verificação do funcionamento do Theremin

Para possibilitar a caracterização de todo o sistema, isto é, o sistema de aquisição/recepção e o software desenvolvido, realizaram-se medições da posição da mão segundo algumas características:

- Ensaio 1 - Medição da posição da mão para as distâncias 10, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros;
- Ensaio 2 - Medição da posição da mão para um movimento contínuo e ascendente;
- Ensaio 3 - Medição da posição da mão para um movimento tipo vibrato².

Estas medições foram realizadas tendo por base o diagrama apresentado na figura 5.1

¹Entende-se desempenho pretendido, como a medição correcta da posição da mão com a máxima precisão possível, de modo, a ter uma variação da frequência tão contínua como a do *Theremin* original

²Movimento rápido e repetitivo de pequena amplitude, sendo neste caso um movimento com cerca de 15 centímetros

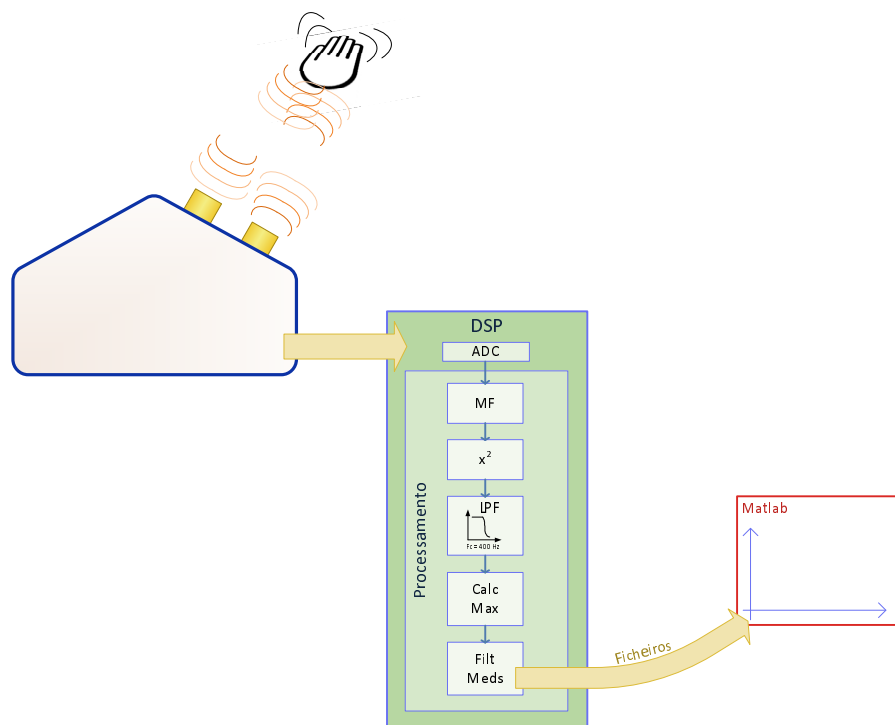


Figura 5.1: Diagrama ilustrativo da metodologia dos ensaios realizados

Como se pode verificar pelo diagrama da figura 5.1, o processamento é realizado no *DSP* com o software desenvolvido. Após a termo do processamento, são criados ficheiros com as medições correspondentes ao ensaio corrente e, posteriormente, os dados são analisados no matlab.

5.3 Resultados finais

Com a finalização do desenvolvimento do sistema, quer ao nível do hardware, quer ao nível do software, foi necessário realizar ensaios destinados a verificar o desempenho e eficiência do sistema agora existente. Os testes cumpriram a metodologia descrita em 5.2.

5.3.1 Detecção da posição da mão

Teste com um receptor

Para verificar a correcta detecção da posição da mão efectuou-se o ensaio 1 com as condições descritas em 5.2.

Dado que os efeitos do filtro mediana e o filtro média (referidos em 4.3) não foram testados neste ensaio, fez-se a aquisição de medidas com a aplicação de um só filtro (mediana) e com os dois filtros (mediana mais média). No gráficos das medições obtidas apresentam-se os resultados para os dois filtros separadamente. Nas figuras 5.2a e 5.2b encontram-se os gráficos

referidos. É necessário referir que a medição para 10 centímetros não é apresentada, uma vez que este valor é menor do que a gama permitida (ver secção 4.2.3. Por fim, há que salientar o facto de as medições estarem a ser realizadas com a mão, o que só por si poderá originar erros, maiores que o erro inerente ao sistema. Este factor poderá degradar os resultados dos testes efectuados.

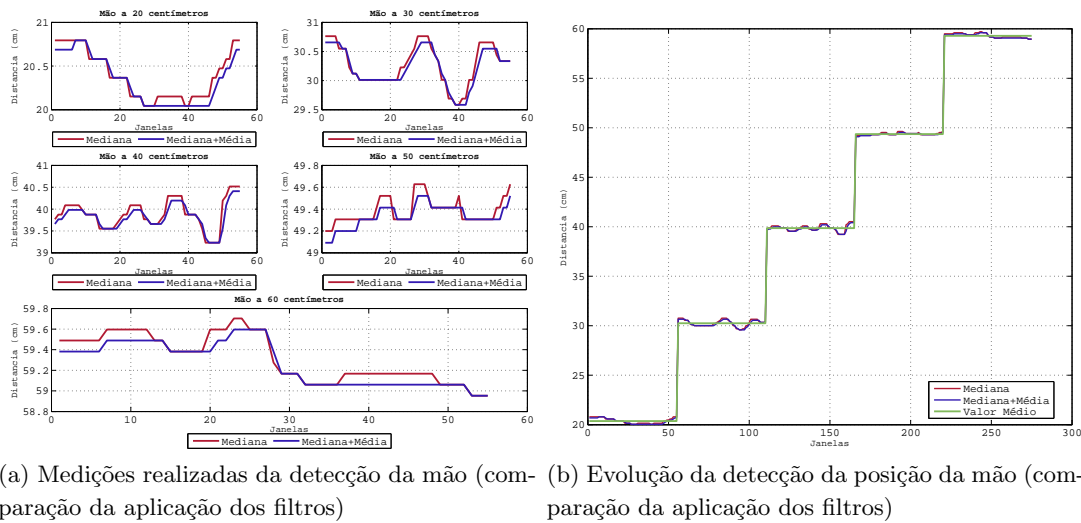


Figura 5.2: Resultados obtidos para o ensaio 1

Em análise aos resultados, verifica-se que a detecção da mão é realizada correctamente, obtendo um desvio padrão máximo (σd) de $0.35cm$, sendo o erro mínimo de $0.21cm$ imposto pelo sistema, como mencionado em 3.2.1.

Em relação à diferença entre a aplicação de um só filtro (mediana) ou aplicação dos dois (mediana e média), observa-se na figura 5.2a que o filtro média diminui as pequenas variações, como tinha sido projectado. Em termos de reactividade, através dos gráficos, conclui-se que o sistema responde rapidamente, acompanhando os movimentos da mão.

Para além de medições correctas, o sistema também tem de ser reactivo, isto é, perante a variação rápida da mão, o sistema tem responder de igual forma. Com este princípio, decidiu-se testar o sistema para esta característica, realizando os ensaio 2 e 3 mencionados em 5.2. Nas figuras 5.3a e 5.3b apresentam-se os resultados para estes ensaios.

Teste com três receptores

Para a verificação do bom funcionamento do sistema de aquisição multi-sensor, realizou-se um teste de medição de três distâncias - 10 cm, 30 cm e 50 cm. Este teste tem a finalidade de demonstrar a estabilidade das medições efectuadas à posição da mão, tal como é o objectivo do sistema em causa. Na figura 5.4 estão apresentados os resultados deste teste.

Como se pode verificar, as medições apresentam grande estabilidade. Foi alcançado um desvio padrão máximo de aproximadamente $0.12cm$. Considerando a distância medida uma

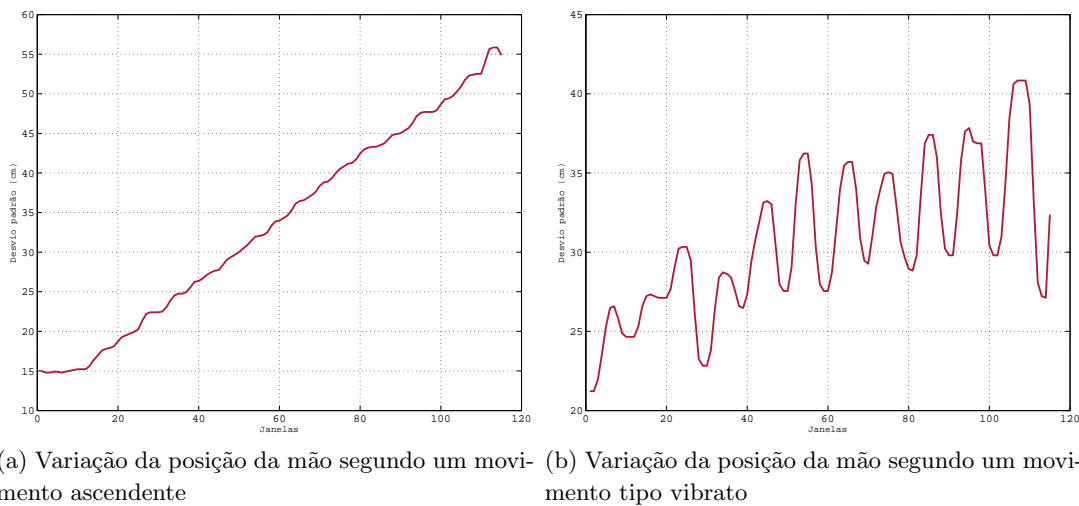


Figura 5.3: Resultados obtidos para os ensaio 2 e 3

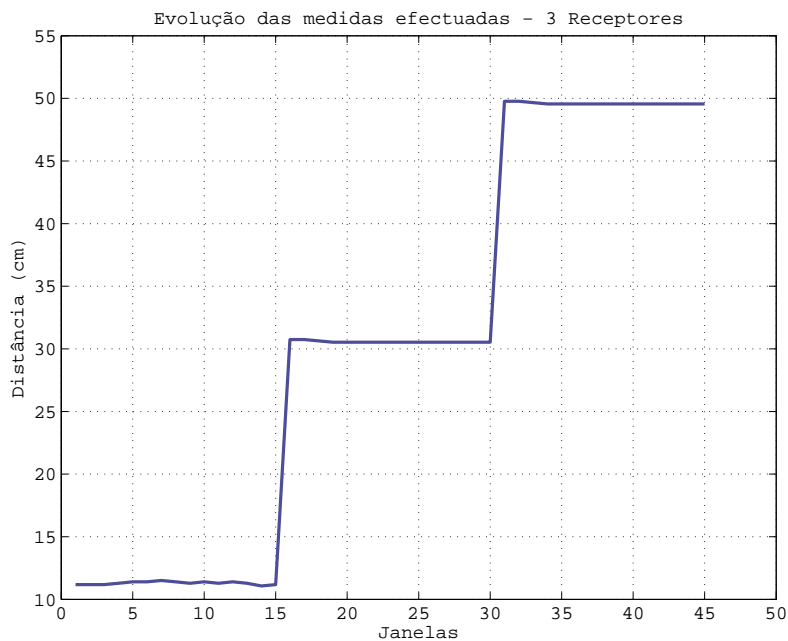


Figura 5.4: Evolução da detecção da posição da mão - 3 receptores

variável aleatória e assumindo uma distribuição gaussiana, o desvio padrão será reduzido de \sqrt{N} . Sendo N o número de sensores, calcula-se o desvio padrão esperado, como demonstrado em 5.2.

$$\sigma d_3 = \frac{\sigma d}{\sqrt{3}} \quad \begin{array}{ll} \sigma d & - \text{ desvio padrão para 1 sensor} \\ \sigma d_3 & - \text{ desvio padrão para 3 sensores} \end{array} \quad (5.1)$$

$$= \frac{0.35}{\sqrt{3}} = 0.20 \text{ cm} \quad (5.2)$$

Verifica-se a partir em 5.2 que o valor do desvio padrão obtido é inferior ao valor esperado. Esta diferença é explicada pelo evolução realizada ao *hardware*, como descrito em 4.4.6.

Para a comparação dos dois sistemas de detecção da posição da mão, escolheu-se a medição de 30cm. Na figura 5.5 pode-se verificar que a utilização de três sensores permite uma maior estabilidade das medições realizadas.

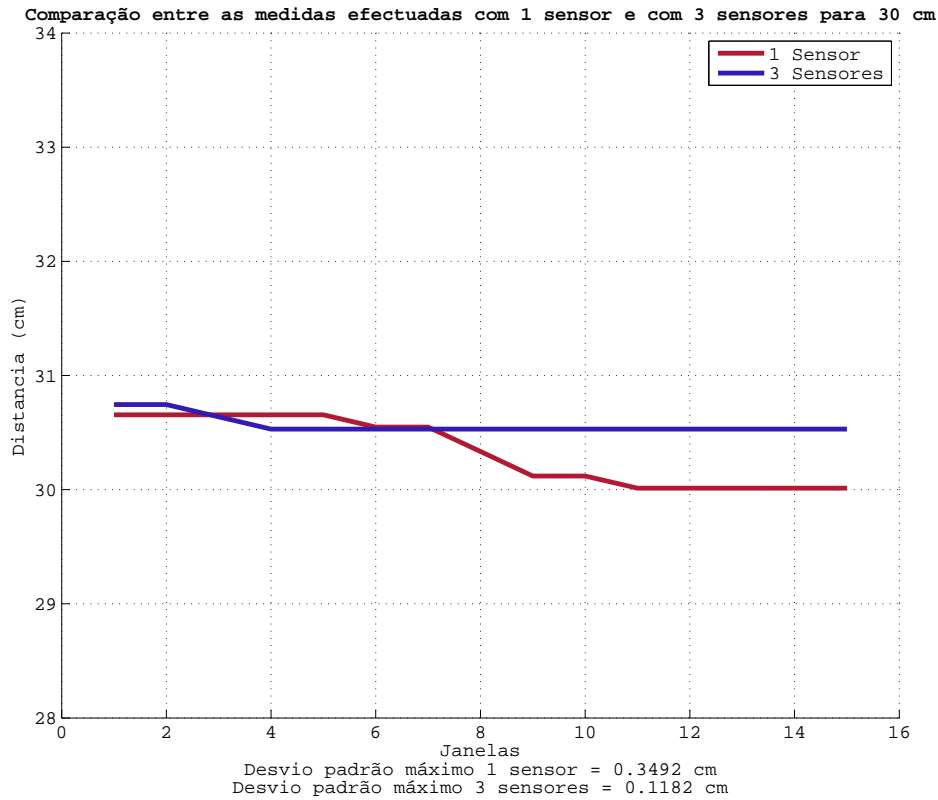


Figura 5.5: Comparação das medições efectuadas - 1 receptor e 3 receptores

5.3.2 MIDI e saída áudio

Para a verificação do funcionamento dos blocos *MIDI* e áudio, realizaram-se ensaios semelhantes aos descritos em 5.2. Os resultados destes testes encontram-se na página do grupo de trabalho *LocUS* (ver [LOC07]) no projecto Theremin sob a forma de um vídeo.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

6.1 Discussão geral dos resultados

O desenvolvimento de um Theremin ultra-sónico teve como finalidade aproximar o *Theremin* das mentes mais futuristas e da *Computer Music* cuja importância se tendo vindo a afirmar cada vez mais. Após um longo percurso de aperfeiçoamento do sistema, construiu-se um protótipo que alcança a generalidade dos objectivos propostos.

No que toca à detecção da posição da mão do *performer*, com o sistema composto por um único par emissor/receptor, tinha-se conseguido um desvio padrão de $0.35cm$. O sistema multi-sensor (um emissor e três receptores) actualmente utilizado permitiu uma redução muito significativa desse desvio (para aproximadamente $0.12cm$).

Conseguiram-se também importantes progressos do ponto de vista da reactividade (rapidez de resposta) do sistema, que se revela satisfatória em ambos os modos de geração áudio (quer directa, via saída *Line*, quer através da interface MIDI).

6.2 Trabalho futuro

A interface MIDI proporciona múltiplas oportunidades de trabalho futuro, dado que permite ligar o *ThereMax* a uma enorme panóplia de dispositivos MIDI (e.g. computadores, sintetizadores, controladores de volume, pedais de efeitos).

A utilização de *packages* de *software* tais como o MAX, descrito em 2.3.3, amplia essas oportunidades, visto que as mensagens MIDI enviadas pelo *ThereMax* podem ser utilizadas como mensagens de controlo de blocos de manipulação de sons, produção de imagem ou geração de efeitos multimédia. Na página do grupo de trabalho *LocUS* (ver [LOC07]), encontra-se um exemplo de aplicação desenvolvido em MAX ¹. Trata-se de um modulador FM em que as mensagens MIDI controlam a frequência da portadora. Manualmente, é possível alterar o índice de modulação, o *attack time* e o *release time*.

¹da autoria de Rui Penha, docente no Departamento de Comunicação e Arte da Universidade de Aveiro [Pen07]

O trabalho futuro poderá também incidir na vertente de *hardware*. O recurso a mais sensores proporcionaria mais graus de liberdade, permitindo assim mapear (e.g. através do MAX) o movimento de múltiplas partes do corpo. Com o desenvolvimento de *software* menos exigente relativamente a poder de processamento (vide [4.4.6](#)), será possível migrar para uma solução baseada num microcontrolador de baixo custo. Com esta migração, o *ThereMax* poderá tornar-se um produto comercial competitivo.

Merece estudo também a possibilidade de utilizar sensores de outros tipos (e.g. sensores infravermelhos) em combinação com os actuais ou em sua substituição.

Face às pistas de trabalho futuro enunciadas, as possibilidades de evolução do projecto *ThereMax* estão apenas limitadas pela criatividade das pessoas que venham a abraçá-lo.

Bibliografia

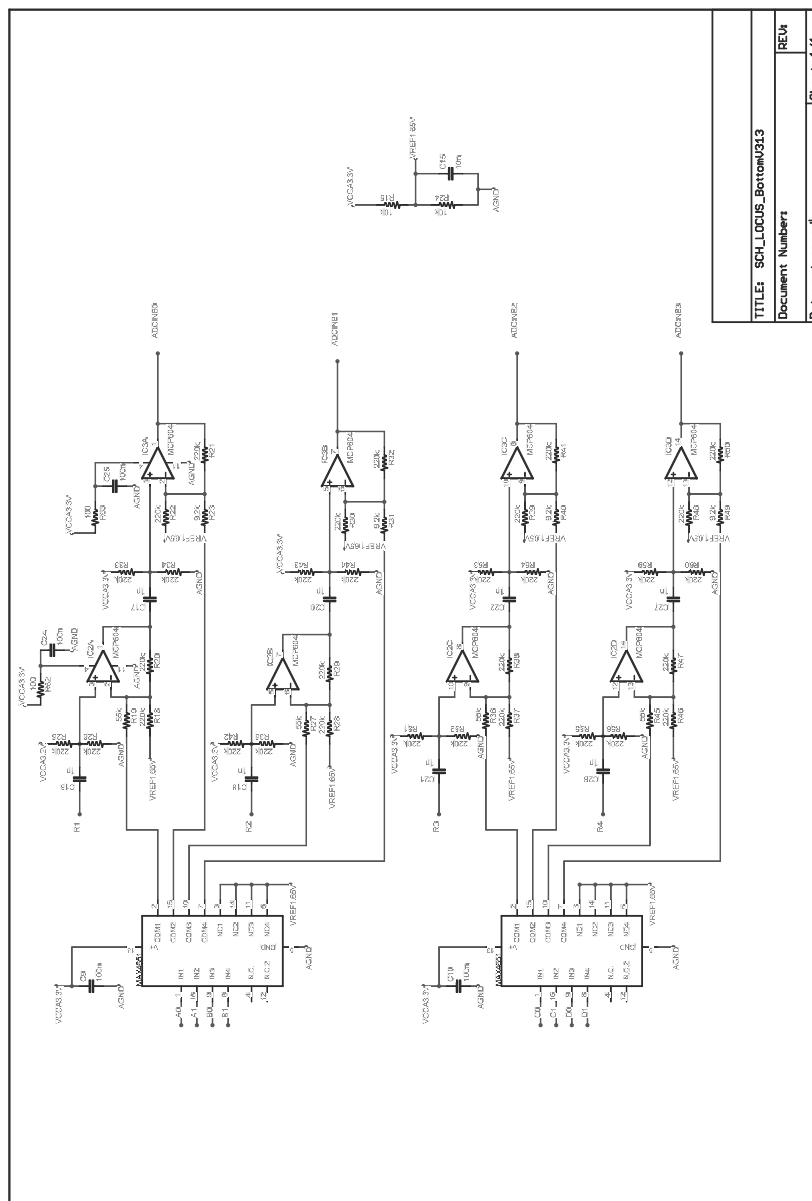
- [’7408] Cycling ’74. Cycling ’74, 2008. url=<http://www.cycling74.com/products/max5>.
- [A.86] Carlson A. *Communication Systems*. McGraw-Hill, 3 edition, 1986.
- [Alb07] D. Albuquerque. Sistema de localização com ultra-sons. Technical report, Universidade de Aveiro, 2007.
- [B.00] Katz B. Acoustic absorption measurement of human hair and skin within the audible frequency range. Technical report, The Pennsylvania State University, August 2000.
- [Bal01] Malcolm Ball. List of works of olivier messiaen, 2001. url=<http://www.oliviermessiaen.org/messiaen2index.htm>.
- [Ben08] Dave Benson. Interview with john chowning, by tom darter, 2008. url=<http://www.maths.abdn.ac.uk/bensondj/html/Chowning.html>.
- [Cha06] Chris Chafe. Chris chafe - home page, 2006. url=<http://www-ccrma.stanford.edu/cc/>.
- [Clu06] C. E. “Sonny” Clutter. Moog music, 2006. url=<http://www.radiolaguy.com/>.
- [Col04] Fred Collopy. Three centuries of color scales, 2004. url=<http://rhythmiclight.com/archives/ideas/colorscales.html>.
- [Cou07] E. Couto. Detecção activa de obstáculos móveis para apoio à condução. Technical report, Universidade de Aveiro, 2007.
- [E.55] Garner L. E. Electronics music with the theremin. *Popular Electronics*, April 1955.
- [F.] Iazzeta F. A performance interativa em vaga.
- [G.97] Campos G. Motion-controlled music. Master’s thesis, University of York, 1997.
- [GF96] et. al. Gueuring F., Varlan M. Accurate distance measurement by an autonomous ultrasonic system combining time-of-flight and phase-shift methods. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pages 399–404, 1996.
- [Har02] Mark Harden. Kandinsky: Compositions, 2002. url=<http://www.glyphs.com/art/kandinsky/>.

- [Har06] Arthur Harrison. The 2006 minimum theremin, 2006. url=<http://home.att.net/~theremin1/101/101.html>.
- [ICM07] ICMA. International computer music association, 2007. url=<http://www.computermusic.org/>.
- [IE93] Jervis B. Ifeachor E. *Digital Signal Processing*. Addison-Wesley, 1993.
- [J.95] Rothstein J. *MIDI a comprehensive introduction*. A-R Editions, Inc., 2nd edition, 1995.
- [LOC07] LOCUS. Locus - localização ultra-sónica, 2007. url=<http://www.ieeta.pt/locus/>.
- [Lop06] S. Lopes. Relatório final (semestre 3) - projecto locus. Technical report, Universidade de Aveiro, 2006.
- [Mas07] Miya Masaoka. Miya masaoka - home page, 2007. url=<http://www.miyamasaoka.com/>.
- [McD06] Maura McDonnell. Visual music, 2006. url=<http://homepage.eircom.net/~musima/visualmusic/visualn>
- [Mus08] Moog Music. Moog music, 2008. url=<http://www.moogmusic.com/>.
- [Pen07] Rui Penha. Rui penha - home page, 2007. url=<http://www.ruipenha.pt/>.
- [S.96] Favilla S. Non-linear controller mapping for gestural control of gamaka. 1996.
- [Sag06] Valerio Saggini. Thereminox.com - art, technology and gesture, 2006. url=<http://www.thereminox.com/story/495/>.
- [SSoA00] Inc Scriabin Society of America. Scriabin society of america, 2000. url=<http://www.scriabinsociety.com/>.
- [The05] Theremin.info. Theremin.info, 2005. url=<http://www.theremin.info/>.
- [VJ] Santos P. e Almeida L. Vieira J., Reis J. Detecção de fontes sonoras e obstáculos usando técnicas de correlação.

Apêndice A

Hardware

A.1 Esquema eléctrico da Locus Board V3



A.2 Nova placa de aquisição

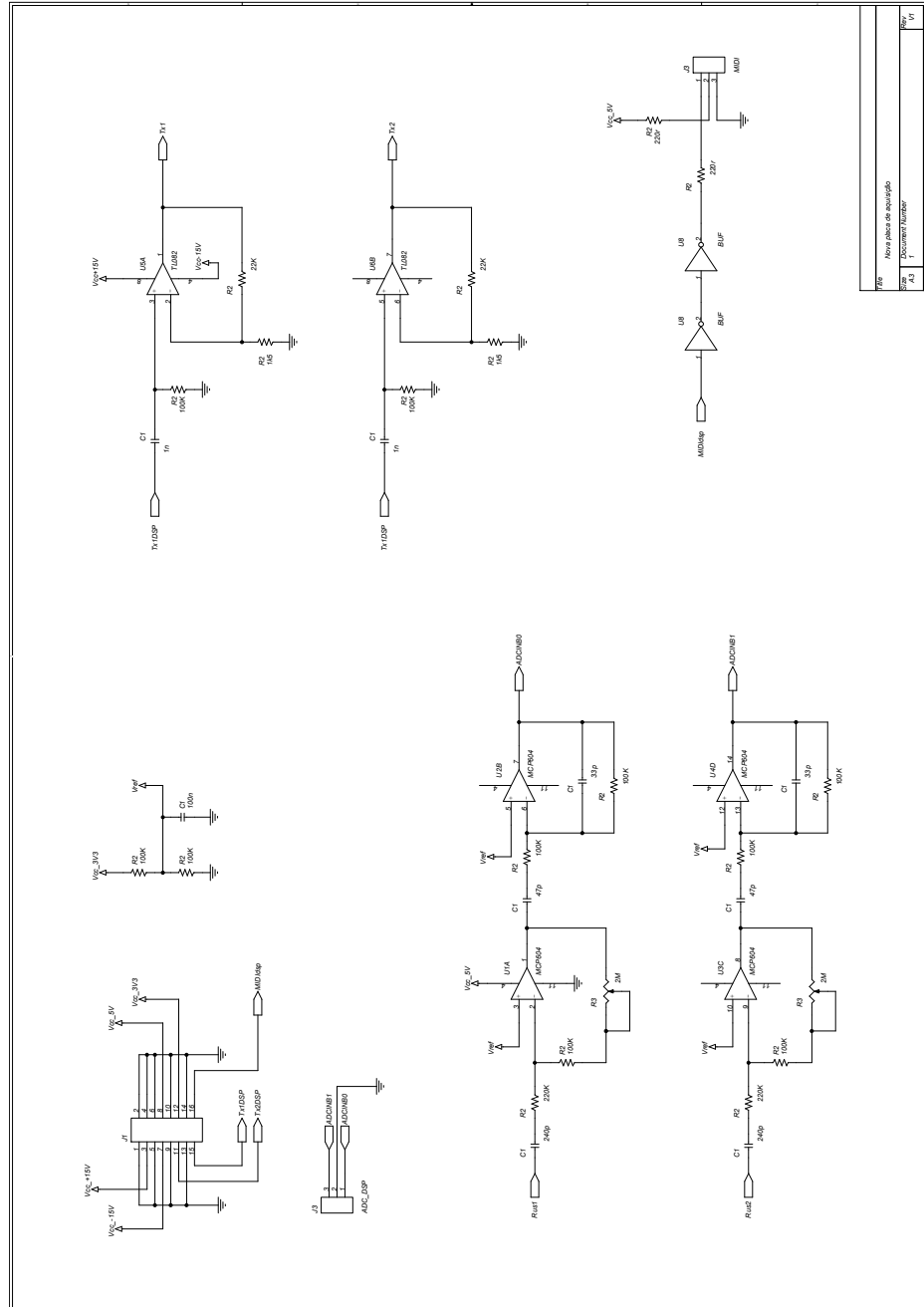


Figura A.4: Esquemático da nova placa de aquisição desenvolvida para a *Locus Board V3*

A.3 Esquema eléctrico da *Locus Board 2007*

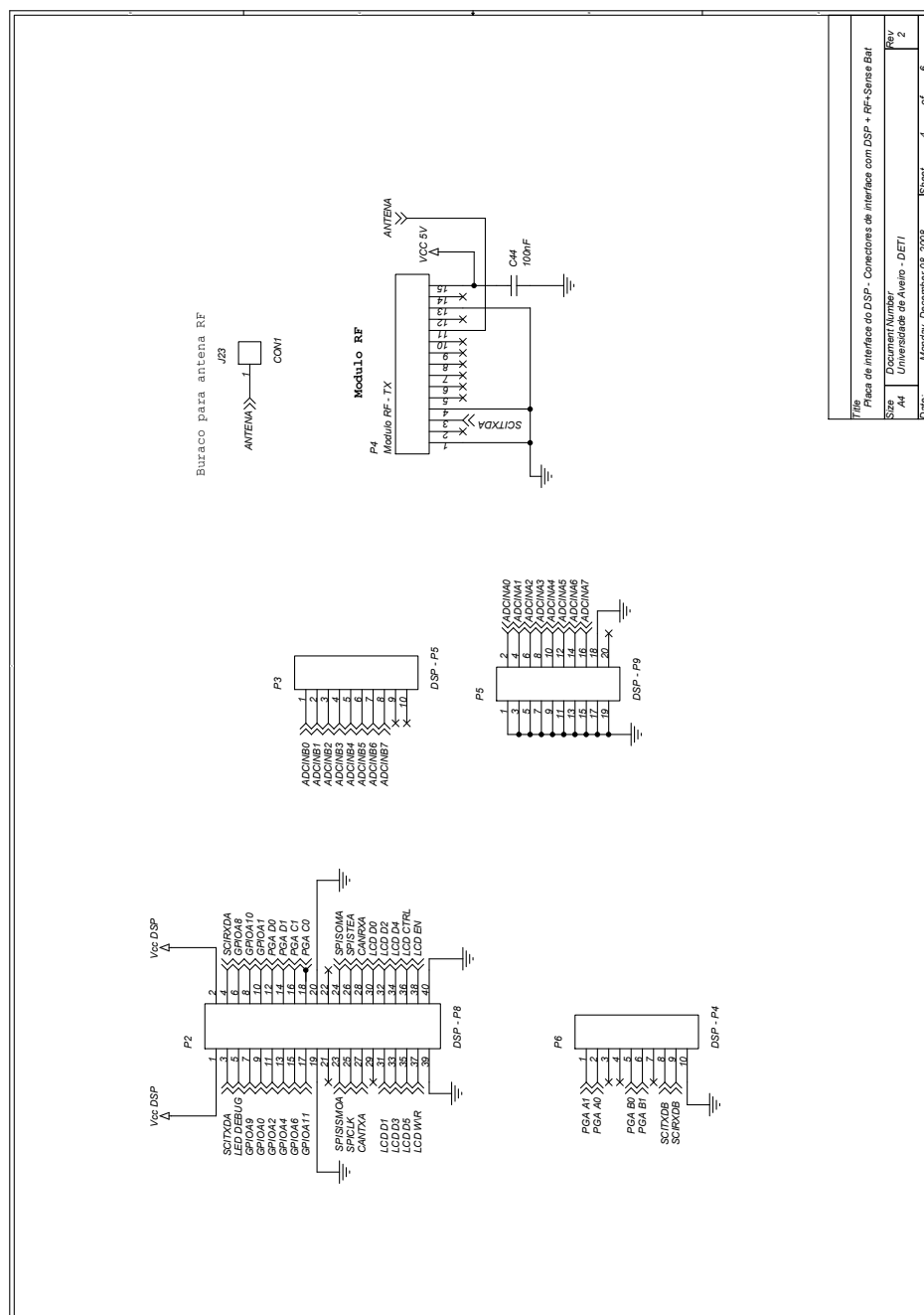


Figura A.5: Esquemático dos conectores existentes na *Locus Board 2007*

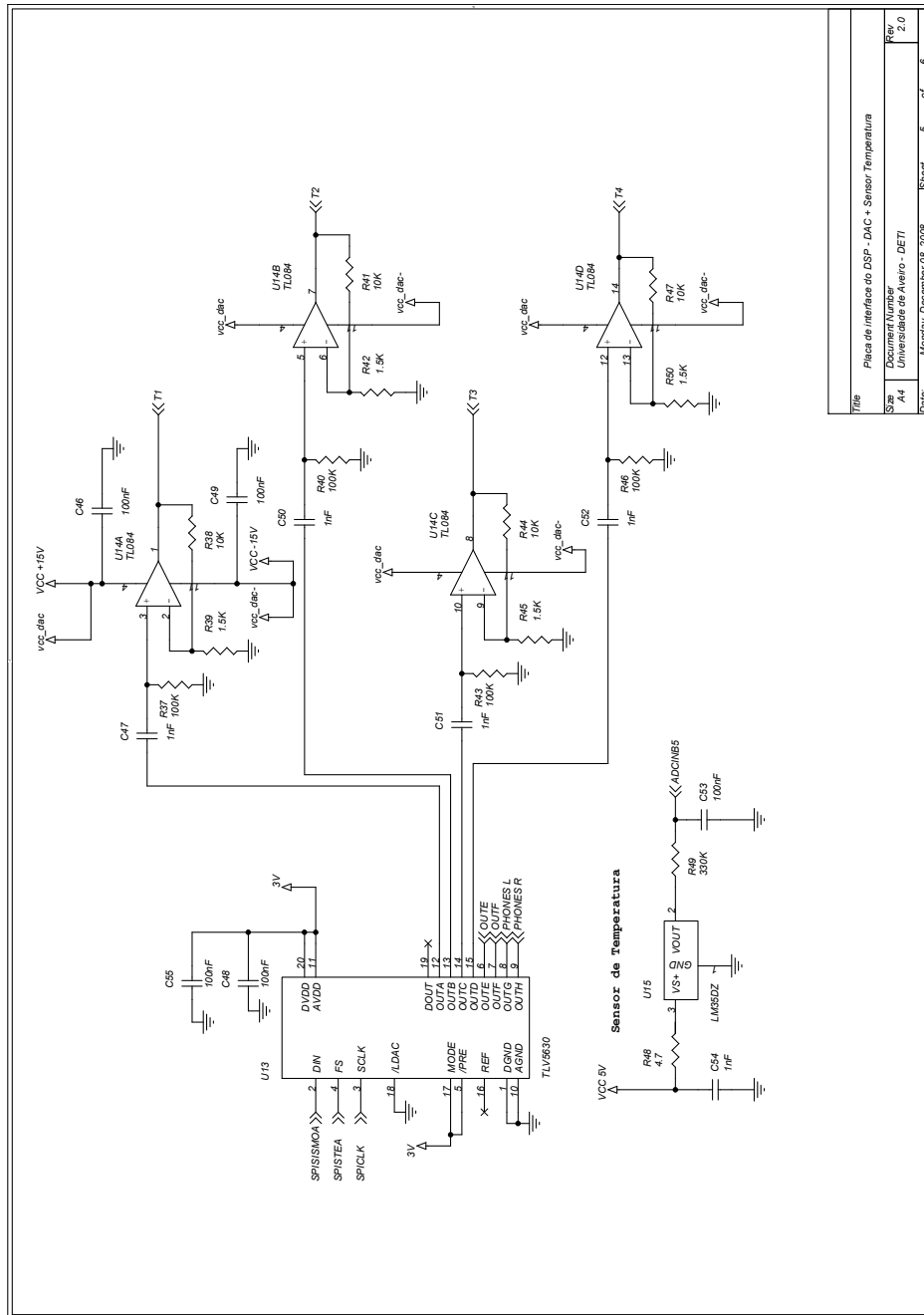
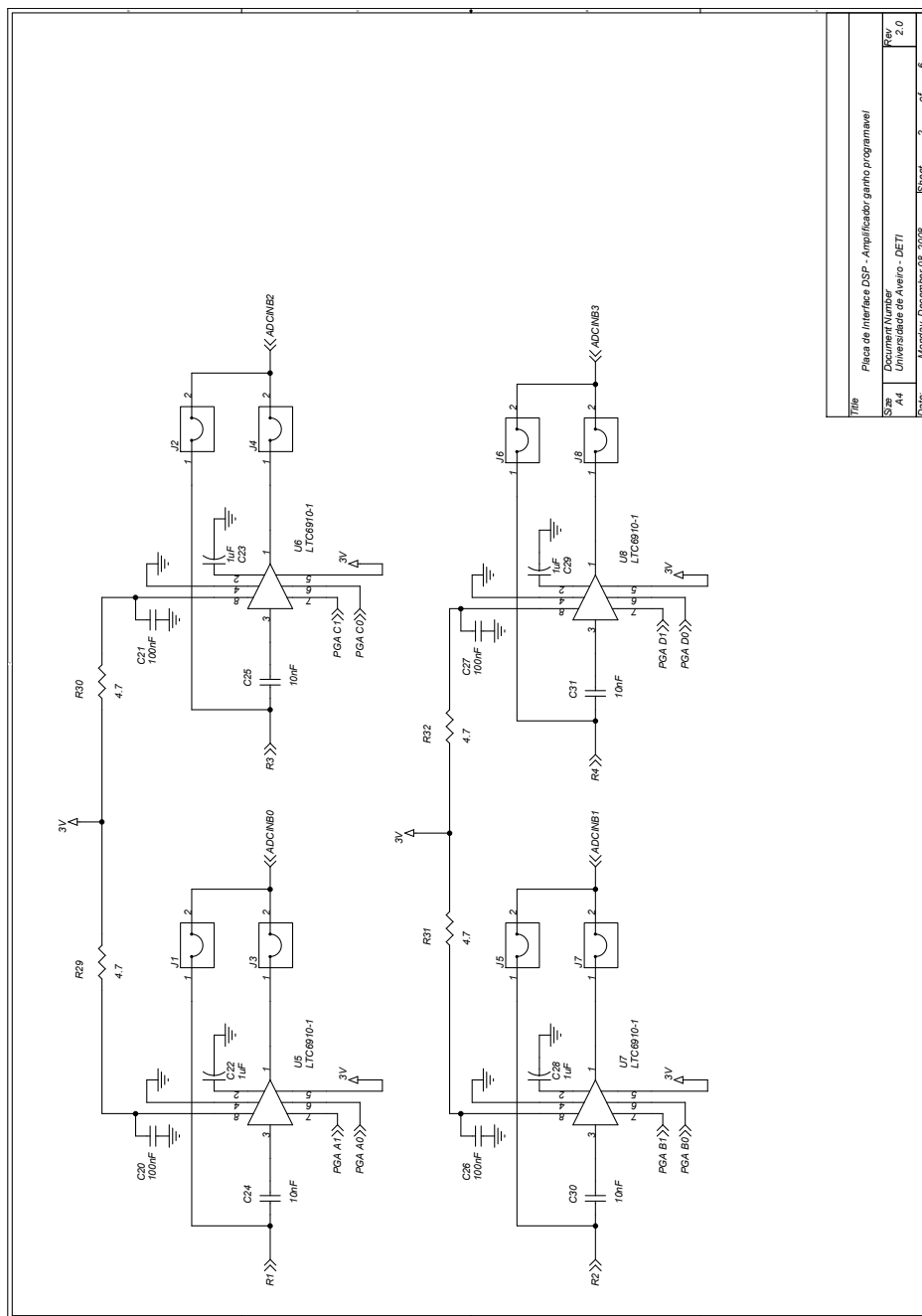


Figura A.6: Esquemático da DAC da *Locus Board 2007*



Title	Placa de Interface DSP - Amplificador ganho programavel
Size	Document Number
Rev	A4
Date	Universidade de Aveiro - DE71
	Monday, December 08, 2009
Sheet	2 of 6

Figura A.9: Esquemático do amplificador de ganho programável da *Locus Board 2007*

A.4 Esquema eléctrico do sistema multi-sensor

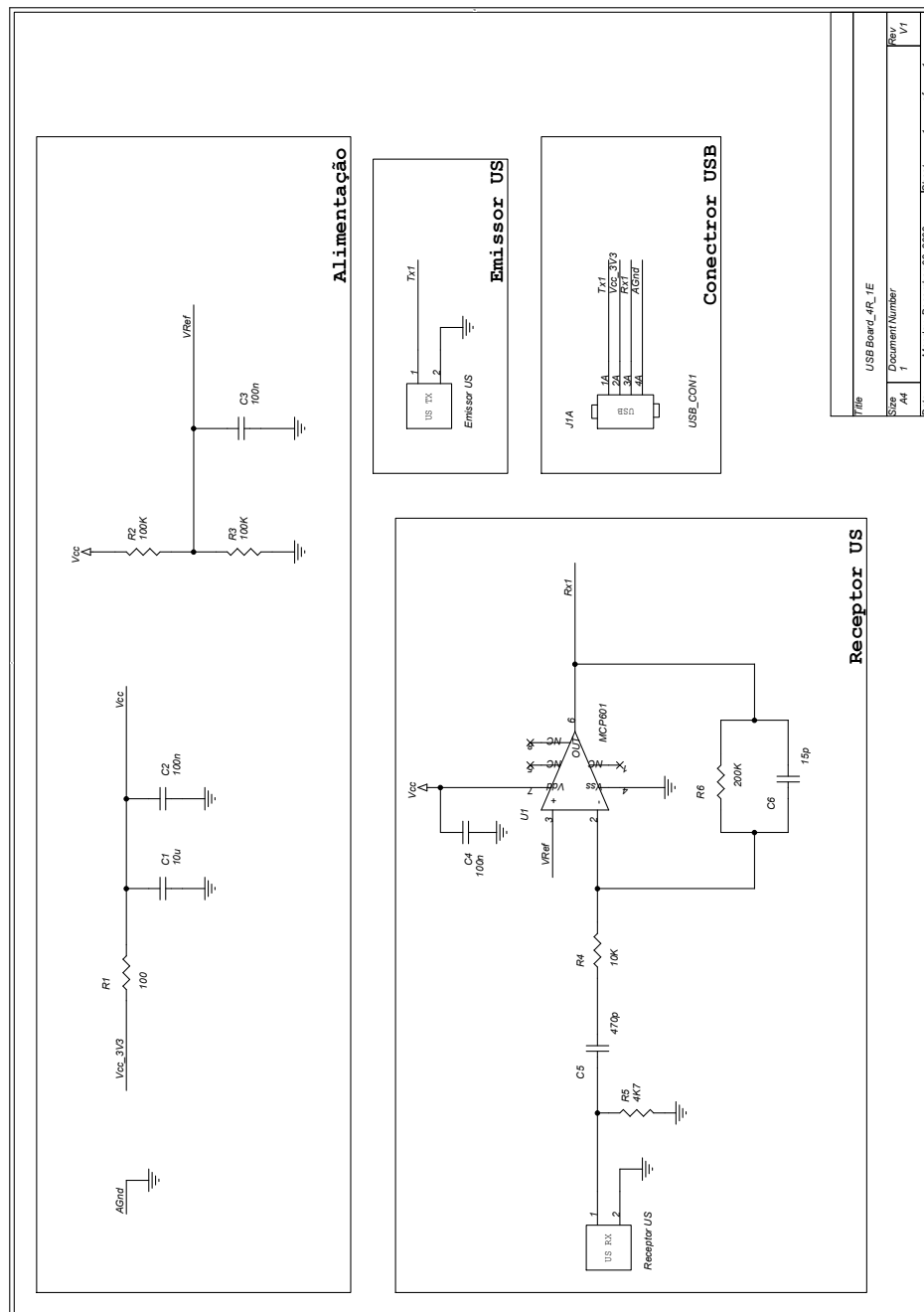


Figura A.11: Esquemático do par emissor/receptor

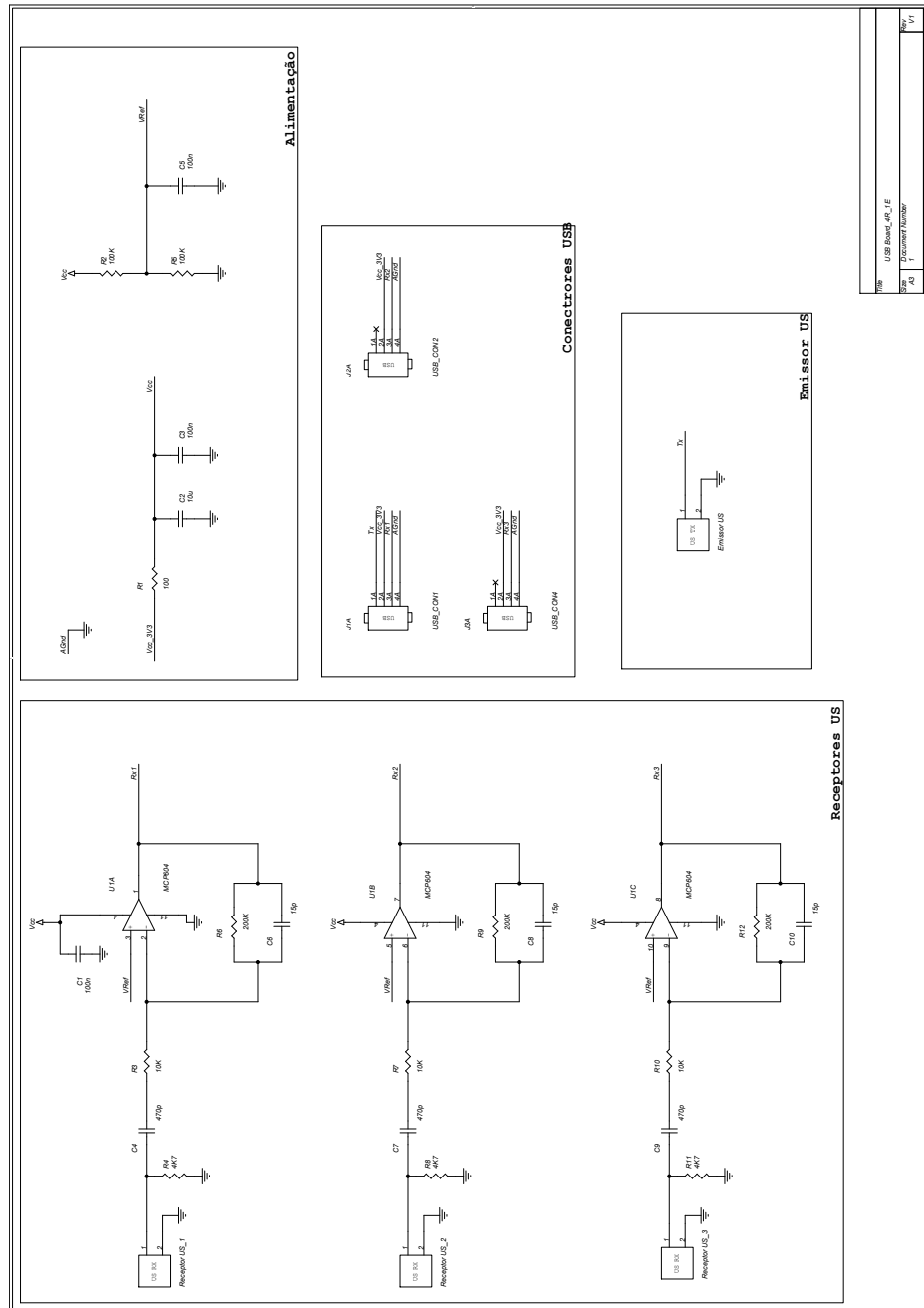


Figura A.12: Esquemático do sistema multi-sensor

A.5 Esquema eléctrico do Ataque dos LED RGB

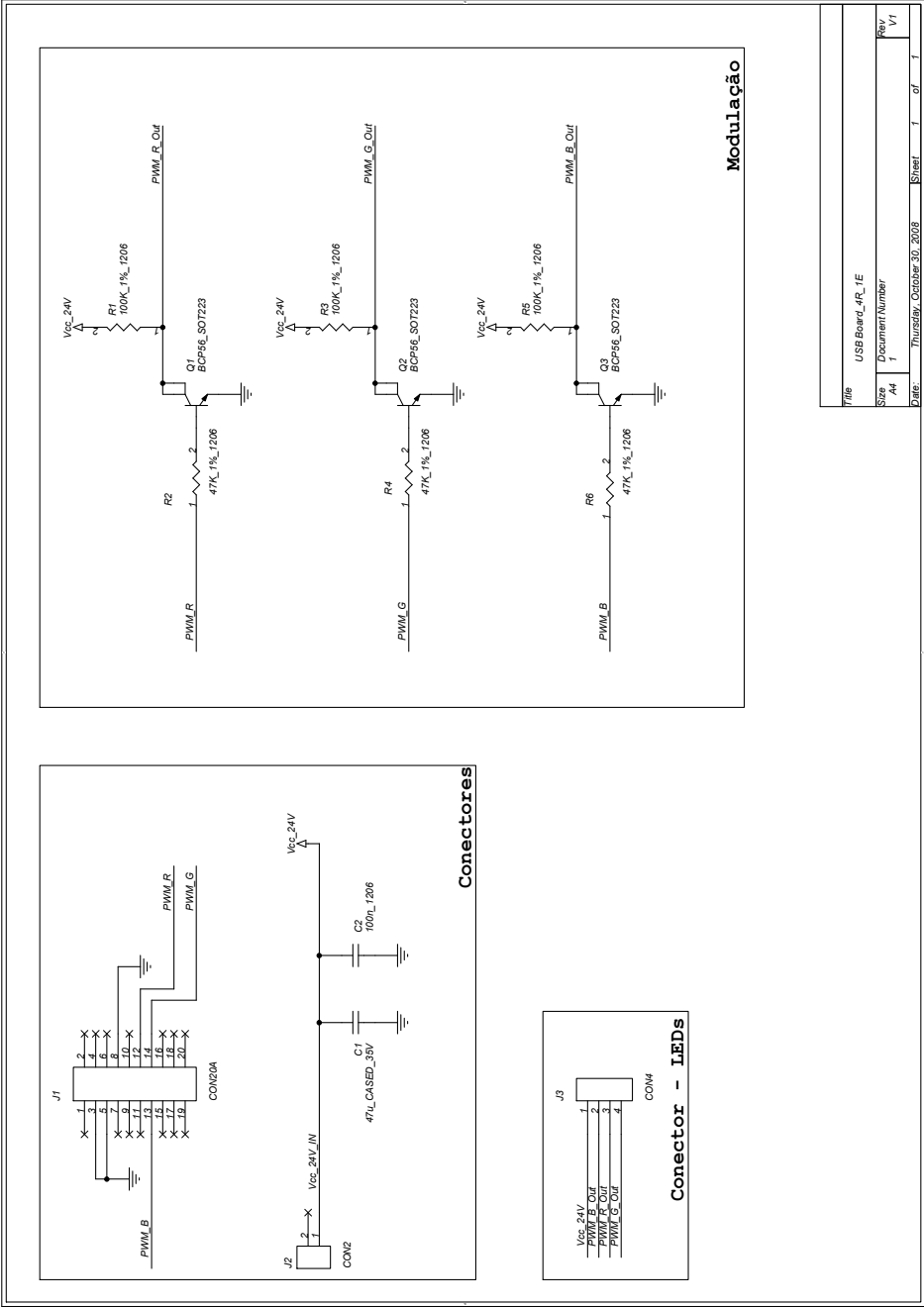


Figura A.13: Esquemático do sistema de ataque dos LED RGB

A.6 *Data sheet* da fonte de alimentação

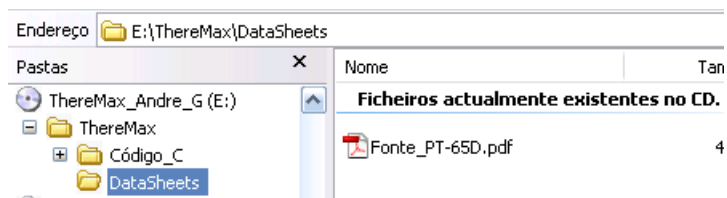


Figura A.14: Localização do ficheiro com o *datasheet* da fonte de alimentação

Apêndice B

Software DSP

B.1 Aquisição/Recepção

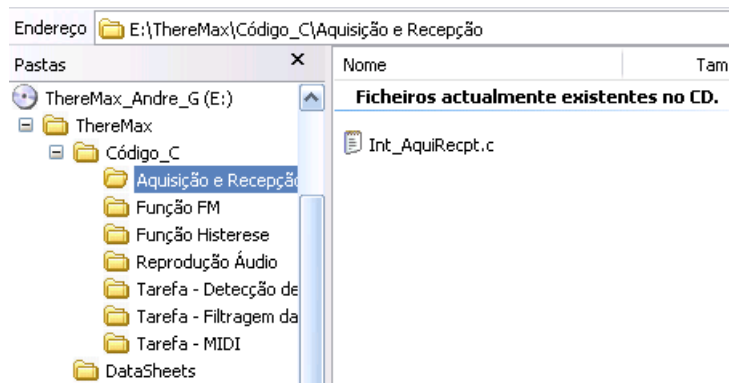


Figura B.1: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a aquisição/recepção

B.2 Detecção de pico

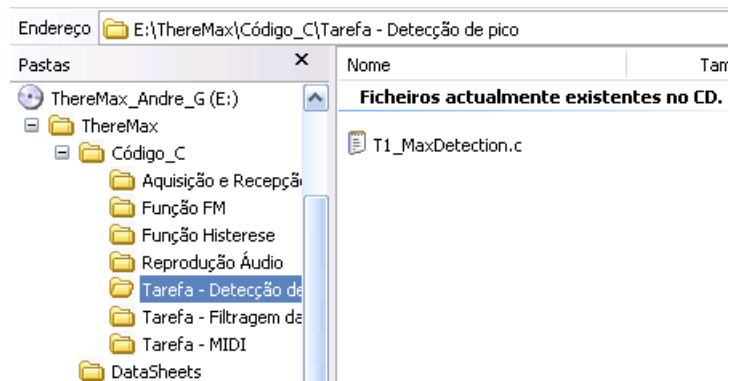


Figura B.2: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a detecção de pico

B.3 Filtragem das Medidas

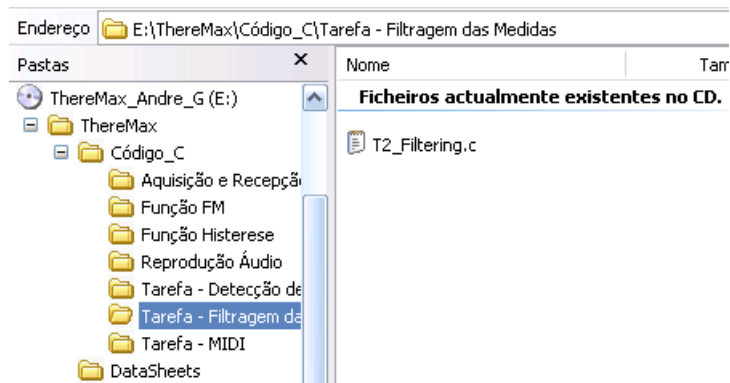


Figura B.3: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a filtragem

B.4 Áudio

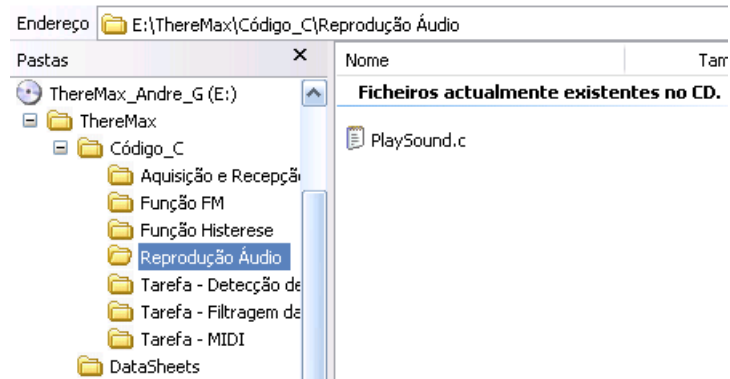


Figura B.4: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a produção de som

B.5 Midi

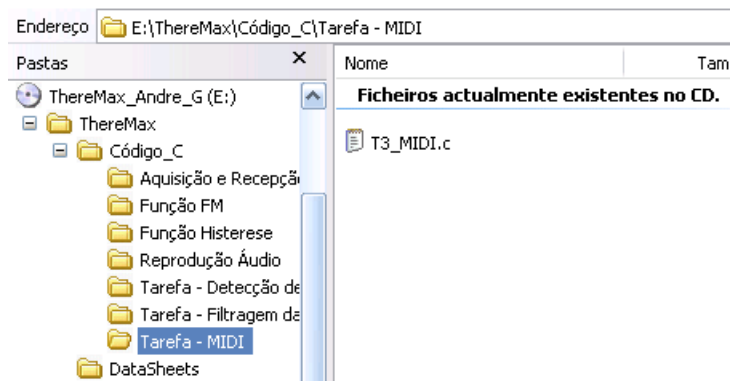


Figura B.5: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para o MIDI

B.6 Função Histerese

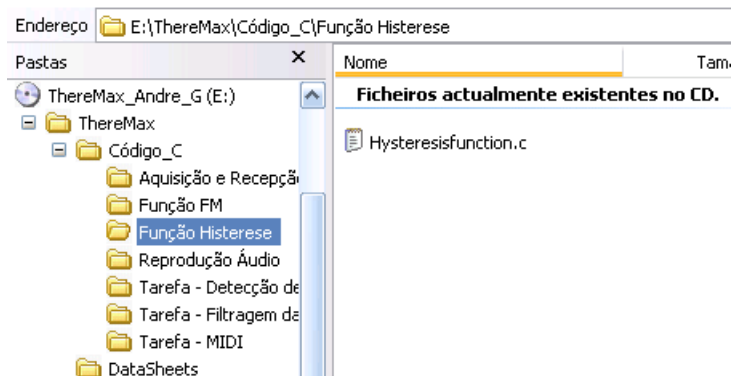


Figura B.6: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para bisterese

B.7 Função FM

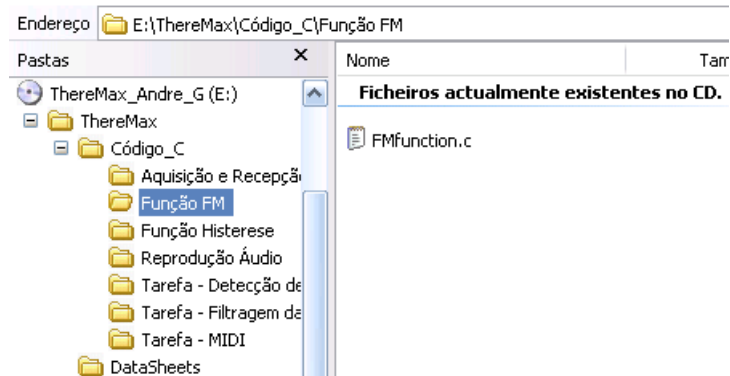


Figura B.7: Localização do ficheiro com o código C desenvolvido para a modulação FM